

Justus-Liebig-Universität Gießen

Fachbereich 07 - Mathematik und Informatik, Physik, Geographie

Diplomarbeit

Prüfungsfach: Klimageographie

Windenergiepotentiale in Mittelhessen

Abgabe: 31.03.2004

Anfertigung: Paul Braun

Erlenwiese 29, 36304 Alsfeld

Themastellung: Prof. Dr. L. King

Institut für Geographie

Senckenbergstraße 1, 35390 Gießen

1 Einleitung	01
2 Literaturübersicht	03
2.1 Windenergie und regenerative Energie	03
2.1.1 Regenerative Energien	03
2.1.2 Windenergie	04
2.1.3 Windenergiepotential	06
2.1.3.1 Klima	07
2.1.3.2 Relief	08
2.1.3.3 Reliefbeschichtung	09
2.1.4 Windkarten	10
2.2 Mittelhessen	10
2.3 Systemanalyse	12
3 Material und Methoden	14
3.1 Material	14
3.1.1 Daten, Information, Wissen (Rohstoffe)	14
3.1.1.1 Geodaten	14
3.1.1.2 Wetterdaten	14
3.1.1.3 Informationen und Wissen	15
3.1.2 Werkzeuge	15
3.1.2.1 Hardware	15
3.1.2.2 Software	16
3.2 Methoden	16
3.2.1 Generierung des Untersuchungsobjekts	16
3.2.2 Systemanalyse	17
3.2.3 Auswertung	19
4 Ergebnisse	20
4.1 Modellentwicklung	20
4.1.1 Teilmodellgruppe Windgeschwindigkeit	20
4.1.1.1 Teilmodell Höhe über NN (a.s.l.)	21
4.1.1.2 Teilmodell Höhe über Grund (a.g.)	22
4.1.1.3 Teilmodell Hangneigung	23

4.1.1.4 Teilmodell Hangrichtung	25
4.1.1.5 Teilmodell Landnutzung	25
4.1.2 Teilmodellgruppe Windvarianz	25
4.1.3 Teilmodellgruppe Luftdichte	25
4.1.4 Teilmodellgruppe Windleistung	25
4.1.4.1 Teilmodell Windleistung - mittlere Windgeschwindigkeit	25
4.1.4.2 Teilmodell Windleistung - variable Windgeschwindigkeit	26
4.2 Das Digitale Höhenmodell von Mittelhessen	27
4.2.1 Höhenkarte von Mittelhessen	27
4.2.2 Hangneigungen in Mittelhessen	29
4.2.3 Hangrichtungen in Mittelhessen	29
4.3 Windkarten von Mittelhessen	31
4.3.1 Windgeschwindigkeit und die Höhe über dem Meeresspiegel	31
4.3.2 Windgeschwindigkeit und Hügелеffekt	33
4.3.3 Windgeschwindigkeit und die Höhe über dem Grund	35
4.3.3.1 Nabenhöhe 50 Meter über Grund	35
4.3.3.2 Nabenhöhe 100 Meter über Grund	37
4.4 Windleistungskarten für Mittelhessen	39
4.4.1 Windleistung aufgrund einer mittleren Windgeschwindigkeit	39
4.4.1.1 Nabenhöhe 50 Meter über Grund	39
4.4.1.2 Nabenhöhe 100 Meter über Grund	41
4.4.2 Windleistung in Abhängigkeit von der Windvarianz	43
4.4.2.1 Nabenhöhe 50 Meter über Grund	43
4.4.2.2 Nabenhöhe 100 Meter über Grund	45
4.5 Workflow Windenergiepotential in Mittelhessen	47
4.5.1 Komponenten des Workflow Windenergiepotential	47
4.5.2 Prozeßdarstellung	48
5 Diskussion	50
6 Zusammenfassung	59
7 Literaturverzeichnis	60
8 Anhang	65

1 Einleitung

Elektrische Energie ist eine der wichtigsten Ressourcen hochtechnisierter Volkswirtschaften. Die stetig wachsende Nachfrage nach dieser Form der Sekundärenergie, hat besonders in der jüngeren Vergangenheit Entwicklungen gefördert, bei denen andere wichtige Ressourcen, wie z.B. Luft, Wasser, Vegetation, beschädigt wurden (Meadows et al. 1972, UBA 2001). Insbesondere die Nutzung begrenzt verfügbarer Primärenergieträger wie fossile Brennstoffe oder Uran trugen zu dieser Entwicklung bei. In den letzten 200 Jahren erlangten diese ein Marktmonopol. Deren Verknappung war jedoch häufig Anlaß für weltpolitische Spannungen (Alt 2002).

Mit Blick auf eine zukunftsfähige Welt, müssen regenerative Energien wieder die Bedeutung erlangen, die sie ehemals innehatten (Schmidt 2002). Inzwischen wird deutlich, daß dies möglich ist. Beispiele dafür sind die Nutzung von Biomasse, Wasser- oder Windkraft (Nitsch 2000). Andere Technologien aus dem Bereich regenerativer Energien sind neu und zum Teil noch wenig entwickelt, z.B. Solarenergie, Erdwärme. Bereits jetzt ist erkennbar, daß ein breiter Mix aus regenerativen Energieformen den Fortschritt der Menschheit keineswegs hemmt. Vielmehr stellt ein solcher Energiemix, gepaart mit effizienter Energienutzung sicher, daß auch künftige Generationen eine lebenswerte Umwelt vorfinden und diesen Planeten nachhaltig nutzen können.

Die Nutzung der Windkraft hat hierzulande eine beachtliche Entwicklung erfahren. Sie erzeugte 2002 bereits 3,5% des elektrischen Strombedarfs in Deutschland (BWE 2003). Dieser Anteil soll nach dem Willen der Bundesregierung auf 25% im Jahr 2025 gesteigert werden (Trittin 2002). Weltweit wird das Potential der Windenergie auf 50% des gegenwärtigen Weltenergiebedarfs geschätzt (Greenpeace 2003). Der Energieträger Wind ist dabei nicht erschöpfbar, wie beispielsweise die Braunkohle. Windenergieanlagen oder WEA können von Terroristen nicht als Waffe benutzt werden wie Kernkraftwerke. Windenergie verbraucht nur einen Bruchteil dessen an Umwelt, was abbaubare Primärenergieträger einfordern. Zugleich verlangen regenerative Energien häufig ein dezentrales Energieversorgungsnetz mit vielen Knoten, bzw. Energieerzeugungsanlagen (Landgrebe et al. 2003). Sie stehen damit in besonderem Widerspruch zu dem gegenwärtigen Versorgungsnetz der etablierten Stromversorger in Deutschland. Dezentrale Stromnetzwerke sind aber weniger katastrophenanfällig als Stromnetzwerke, die sich auf nur wenige, zentrale Energieerzeuger ver-

lassen. Dieser Aspekt der Katastrophensicherheit ist besonders wichtig für hochtechnisierte und vulnerable Wirtschaftsformen (Merz et al. 2002). Ein Ausfall der Stromversorgung hat vor diesem Hintergrund verheerende Folgen, wie der letzte Zusammenbruch der Stromversorgung in den USA veranschaulichte (Leuschner 2003, Schmitz 2003).

Das Auffinden von Windkraftressourcen ist schwierig. Zwar weht Wind mehr oder weniger stark überall in Deutschland, doch reicht dies alleine noch nicht, um eine WEA wirtschaftlich zu betreiben. Der Wind muß eine Mindeststärke und -stetigkeit besitzen. Überdies muß die Anbindung an bestehende Stromnetze preisgünstig sein. Restriktionen aus der Regionalplanung sind zu beachten. Der Einfluß des Reliefs auf das Windenergiepotential ist besonders in Mittelgebirgslagen stärker als bisher zu beachten (Gerdes et al. 1997). Wie bei der Suche nach Bodenschätzen, ist brauchbares und leicht verfügbares Kartenmaterial notwendig, um ein rationelles Suchen nach Standorten zu ermöglichen. Eine entsprechende Karte für Deutschland und Hessen existiert. Sie ist aber an proprietäre Informationen gebunden und nur eingeschränkt offen. Deren Ausarbeitung für Teilbereiche von Hessen ist möglich (Gerth & Christoffer 1994, HLUG_a 2003). Eine Windkarte speziell für die Region Mittelhessen existiert nicht.

Für die vorliegende Arbeit ergeben sich daraus die folgenden Thesen:

1. Die Bestimmung des Windenergiepotentials in Mittelhessen ist mit allgemein zugänglichen Daten möglich.
2. Die Produktion einer Landkarte mit dem Windenergiepotential von Mittelhessen ist mit modernen aber weitverbreiteten Werkzeugen durchführbar.
3. Die Kartenerstellung und Modellierung läßt sich offen darstellen, so daß bei Fortentwicklung des Wissens- oder Datenbestands die Windkarte dieser Diplomarbeit angepaßt werden kann.

2 Literaturübersicht

Die zentralen Punkte dieser Arbeit sind Windenergie (Kap. 2.1), Mittelhessen (Kap. 2.2) und Systemanalyse als Methode zur Lösung der gestellten Aufgabe (Kap. 2.3).

2.1 Windenergie und regenerative Energie

Die Energieversorgung Deutschlands wird hierzulande nicht länger getrennt von der Qualität der Umwelt gesehen. Mit fortschreitendem Erkenntnisprozeß und Wissensstand ist zukünftig auch kein Abflauen dieses Bewußtseins mehr zu erwarten. Regenerative Energien sind ein Teil der Energiebasis, welche der Menschheit zur Verfügung steht. Sie zählen zu den Energien, die gemeinsam mit den erschöpfbaren Energievorräten die Energiebasis der Erde bilden (Kaltschmitt & Marheineke 1997).

2.1.1 Regenerative Energien

Als regenerative Energien werden jene Primärenergien bezeichnet, die nach menschlichem Ermessen unerschöpflich sind und beständig neu zur Verfügung stehen. Sie werden also nicht aufgrund der Nutzung durch den Menschen vermindert. Im Gegensatz dazu werden nicht regenerative oder erschöpfbare Energien durch Abbau zerstört (Kaltschmitt & Marheineke 1997).

Wichtig für die Entstehung regenerativer Energien sind drei Faktoren: Sonne, Erde, und Gravitationskräfte zwischen diesen und dem Mond (Schmidt 2002). Aufgrund dieser drei grundlegenden Faktoren werden durch natürliche Umwandlungen eine Reihe unterschiedlicher Energieströme hervorgerufen (Tab. 2.1).

Tabelle 2.1: Entstehung regenerativer Energien aus den drei grundlegenden Energiequellen innerhalb unseres Sonnensystems (Schmidt 2002).

<i>Energiequelle</i>	<i>Beispiele für daraus entstehende regenerative Energien</i>
Sonne	Solarstrom, Windenergie, Biomasse, Thermik, Regenwolken
Erde	Erdwärme, Wasserdampf, Magmaströme, Wasserkraft
Sonne/Erde/Mond	Gezeiten, Fluten

Die so entstehenden Energien unterliegen teilweise erheblichen jahreszeitlichen und geographischen Schwankungen (Kaltschmitt & Marheineke 1997). Für die gegen-

wärtig aufgebaute Energieversorgungsinfrastruktur in Deutschland entstehen daraus Probleme. Nach wie vor ist das deutsche Kraftwerksnetz darauf ausgerichtet Primärenergieträger beliebig zu lagern und bei Nachfrage umzuwandeln. Die Varianz der Energieproduktion ist von dieser Seite her minimal. Regenerative Energien sind dagegen zum Teil variabel und decken sich nicht unbedingt mit der Nachfragevarianz durch Energiekunden. Dieses grundsätzliche Problem ließe sich durch das Verstetigen des Energieflusses mittels Energiespeicher oder dessen Einbindung in ein offenes Stromnetz mit reaktionsschnellen Reservekraftwerken erreichen (Jarass 1980, Kaltschmitt & Fishediek 1995, Kaltschmitt & Wiese 1997). Andere Überlegungen diskutieren die Produktion eines Primärenergieträgers aus Überschußenergie der regenerativen Stromerzeugung (Molly 2002). Vor dem Hintergrund der anstehenden Erneuerung der Kraftwerkskapazitäten in Deutschland in den kommenden Jahren rückt diese Thematik in das Zentrum der aktuellen wirtschaftspolitischen Diskussion (Köpke & Friedrich 2003).

Unabhängig davon ist erkennbar, daß die sogenannten alternativen bzw. regenerativen Energien ihr additives Dasein für die zeitgenössische Energieversorgung abstreifen. Das Etikett der Additivität besagt, regenerative Energien seien nichts weiter als eine Ergänzung zur konventionellen Energieproduktion, die nicht bedeutsam sei. Spätestens nach dem Abbau der letzten Energievorräte wird die Nutzung regenerativer Energien erneut die Bedeutung einnehmen, die sie in der Vergangenheit bereits hatte (Schmidt 2002).

Neuere Studien stellen dar, das eine Weiterentwicklung des bestehenden Energieversorgungssystems in Deutschland zu einer gänzlich regenerativen Stromversorgung machbar ist. Die Bundesregierung strebt zunächst deren Ausbau auf 10% der Stromversorgung bis 2010 an. 2050 soll dieser Anteil rund 50% ausmachen. Allerdings werden in diesem Szenario bestehende Privilegien für erschöpfbare Energien zurückgebaut (Nitsch 2000).

2.1.2 Windenergie

In der Diskussion um regenerative Energien, taucht hierzulande besonders häufig die Windenergie auf. Sie erreicht mittlerweile Stromerzeugungsanteile, die von den traditionellen Stromerzeugern finanziell gespürt werden. Entsprechend verschärft sich deren Ablehnung von Windenergie (Köpke & Friedrich 2003).

Windenergie ist eine Funktion der Windgeschwindigkeit (Köthe 1994). Die Nutzung der Windenergie wurde bereits im Altertum betrieben, hier noch vornehmlich in der Schifffahrt. Die Nutzung durch Windmühlen wurde zwar schon früh durchdacht aber erstmals im 7. Jahrhundert nach Christus in Persien praktisch umgesetzt und dokumentiert. In Deutschland waren noch im 19. Jahrhundert rund 20000 Windmühlen aktiv (Fröde 1987). Mit Stand vom 30.06.2003 fanden sich in Deutschland 14283 moderne Windenergieanlagen - WEA - im Betrieb (Ender 2003).

Die Umwandlung der kinetischen Energie des Windes ist mit verschiedenen Windradarten möglich. Diese können widerstandsnutzend oder auftriebsnutzend ausgeführt sein. Widerstandsnutzende Anlagen mit vertikaler Achse (Halbkugelschalen, gerade Flächen) werden heute für die Windenergienutzung nicht mehr eingesetzt. Moderne Windkraftanlagen arbeiten mit zur Windrichtung horizontaler Achse und auftriebsnutzenden Rotorflügeln. Der Auftrieb entsteht durch die Luftanströmung am Rotorflügel, die an der Flügelunterseite einen Überdruck und an der Oberseite einen Sog (Unterdruck) erzeugt. Bei der so entstehenden Druckverteilung bewirken Auftriebskräfte die Drehung der Rotorflügel (Gasch 1996). Bei einem auftriebsnutzenden Windrad können der Luftströmung maximal $16/27$ oder rund 60 Prozent der Energie entzogen werden (Schmidt 2002).

Für die Effizienz einer WEA wichtig ist neben deren technischen Kennwerten auch deren Einbindung in ein Stromnetz. Man unterscheidet hier den Netzparallelbetrieb und den Inselbetrieb. Im Netzparallelbetrieb laufen Windkraftanlagen mit nahezu konstanter Geschwindigkeit und direkter Netzanbindung.

Beim Inselbetrieb steht das WEA alleine und hat keine Verbindung zu einem übergeordneten Stromnetz. Solche Anwendungsfälle finden sich z.B. in den Bergen (Almhütten) oder in Entwicklungsländern, wo ein Stromnetz nicht zur Verfügung steht. In diesen Fällen ist die Windenergie mit autarken Systemen für ein weites Spektrum von Anwendungen nutzbar:

- Antrieb von Pumpen zur Trinkwasserförderung, Be- oder Entwässerung;
- Stromerzeugung zum Antrieb von Motoren, Aufladen von Batterien;
- Beleuchtung;
- Erwärmung, z.B. von Waschwasser, Heizung oder Sterilisation;
- Kühlung, z.B. von Nahrungsmitteln oder Medikamenten.

Oftmals arbeiten Windenergieanlagen im Inselbetrieb - zur Erhöhung der Versor-

gungssicherheit - im Verbund mit einer Photovoltaikanlage oder einem Diesellaggregat (Ecowatt 2003). Über die Chancen einer Insellösung im Zusammenhang mit Offshore Windparks berichtet Molly (2002).

2.1.3 Windenergiepotential

Die Kraft des Primärenergieträgers Wind ermöglicht die Produktion der Sekundärenergie Strom. Dabei bestimmt vor allem die Windgeschwindigkeit wie hoch die nutzbare Energie im Wind ist.

Tabelle 2.2: Leistung des Windes in Abhängigkeit von dessen Geschwindigkeit¹.

m/s	Watt/m ²	m/s	Watt/m ²	m/s	Watt/m ²
0,00	0,00	5,00	76,56	10,00	612,50
1,00	0,61	6,00	132,30	11,00	815,24
2,00	4,90	7,00	210,09	12,00	1058,40
3,00	16,54	8,00	313,60	13,00	1345,66
4,00	39,20	9,00	446,51	14,00	1680,70

¹ für eine Luftdichte von 1,225 kg/m³.

Obwohl die Leistung des Windes bei einer Geschwindigkeit von z.B. 7 m/sec rund 210 W/m² beträgt, ist zu beachten, daß die tatsächliche Windleistung eines Standorts mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 7 m/sec in Mitteleuropa etwa doppelt so groß ist (VDWI 2003). In der Tabelle 2.2 wurden die Windleistungen für einen über das Jahr hinweg gleichmäßig wehenden Wind berechnet. Tatsächlich unterliegt diese Windgeschwindigkeit aber Schwankungen. Erfahrungsgemäß wird diese Varianz von einer Weibull-Verteilung gut nachgebildet (Gasch 1996). Aufgrund der Zunahme der Windleistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit erlangen hohe Windgeschwindigkeiten ein unverhältnismäßig starkes Gewicht. Das bewirkt in der Summe eine Leistungserhöhung des Windes um etwa den Faktor zwei. Ein so bestimmtes Windenergiepotential ist von einer Windmühle jedoch nicht vollständig auszubeuten. Aufgrund theoretischer Überlegung, dem Betz' schen Gesetz, kann dieser Ausnutzungsgrad maximal 16/27 betragen. Moderne Windkraftanlagen erreichen bereits Ausnutzungsgrade von rund 50% der im Wind enthaltenen Energie (Schmidt 2002).

Schließlich vermindert sich die Ausbeute der Windenergieanlage noch einmal aufgrund der aktuellen Situation an einem Windstandort. Hier können Einflußfaktoren, wie das lokale Terrain mit möglichen Leewirkungen, Düseneffekten, örtliche Landnutzung, Kleinklima sowie die Wechselwirkung der spezifischen WEA mit den Gegebenheiten vor Ort zu einer Änderung der Leistungsausbeute aus der im Wind enthaltenen Energie führen (Seifert 1990, VDWI 2003). Somit zeichnen sich die folgenden wichtigen Einflußfaktoren für das Windenergiepotential ab: Klima, Relief und Reliefbeschichtung.

2.1.3.1 Klima

Das Klimaelement Wind unterliegt bekannten Gesetzmäßigkeiten. Wind entsteht als Folge von Luftdruckunterschieden in der Atmosphäre, die ihrerseits eine Folge unterschiedlich starker Erwärmung der Luft sind. Diese Varianz in der Lufterwärmung ist als Folge von Unterschieden auf der Erdoberfläche und der jahreszeitlichen Änderung der Erdposition zur Sonne zu verstehen (Lauer 1995). Windstärke bzw. Windgeschwindigkeit sind Funktionen des genannten Druckunterschieds, den die Luftteilchen auszugleichen versuchen. Die Windrichtung ergibt sich aus der Lage der Luftdruckunterschiede zueinander. Sie wird überdies von der Erdrotation beeinflusst (Kaltschmitt & Fishediek 1995).

Für die Nutzung der Windenergie sind die Windverhältnisse in der planetaren Grenzschicht oder Grundschicht bzw. Pephosphäre bestimmend. Das ist die atmosphärische Schicht, die vom Relief stark beeinflusst wird und in der die intensivsten Witterungserscheinungen stattfinden (Lauer 1995). Bis zu einer Höhe von 150 Metern über Grund wird diese als Prandtl-Schicht bezeichnet (Christoffer & Ullbricht-Eissing 1989).

Mitteleuropa, und damit auch Mittelhessen, liegt in den westwindgeprägten Mittelbreiten der nördlichen Hemisphäre. Kennzeichnend für diese zyklonale Westwindzone ist eine sehr unbeständige Witterung und ein hoher Anteil westlicher Winde. Mitteleuropa unterliegt einem häufigen Wechsel zwischen kurzen Schlechtwetterperioden und mehrtägigen antizyklonalen Schönwetterperioden. Die Westwetterlagen dominieren mit 53% das Klima in Mitteleuropa. Mit 33% folgen die Ostwetterlagen, von denen lediglich 16% reine Ostwettersituationen darstellen und 17% zentrale Hochlagen sind, die gemeinhin nur geringe Luftbewegungen aufweisen (Lauer 1995).

Auch kleinräumige Windsysteme können für die Nutzung von Windenergie ausreichend Leistung liefern. Ein Beispiel für die Nutzung eines Land/Seewind Systems sind WEA in Kalifornien/USA (HBS 1999). Sogenannte Aufwindkraftwerke erzeugen lokale Windsysteme bewußt und nutzen die Energie aus der entstehenden Thermik zur Stromerzeugung (Schlaich 1995).

Wie der Intergovernmental Panel on Climate Change in seinem Bericht zum Weltklima feststellte (IPCC 2001), muß in Zukunft mit einem Wandel der Klimatelemente gerechnet werden. Davon betroffen wären auch die Windenergiepotentiale von Regionen, wie Mittelhessen. Arbeiten am Sonderforschungsbereich 419 zu Köln weisen auf eine Abnahme mittlerer zugunsten höherer Windgeschwindigkeiten hin (Speth et. al. 2000).

2.1.3.2 Relief

Die Erdoberfläche wird strukturiert von geogenen Faktoren, deren Ergebnisse unmittelbar der Verwitterung unterliegen. Das so entstandene Relief kann die Windgeschwindigkeit bremsen oder beschleunigen (Bürger 2002). Besonders deutlich wird dieses Phänomen im Vergleich Meeres- und Landoberfläche. So wird der vom Meer kommende Wind über der Landoberfläche regelmäßig verlangsamt (Leser et al. 1995). Bei dieser Verlangsamung spielt die Reliefbeschichtung bzw. Landnutzung eine Rolle. In verschiedenen Arbeiten wird daher auf die Wichtigkeit der Topographie für die Auswahl von Windenergiestandorten hingewiesen (Gerdes et al. 1997, Hierteis 1999)

Eine weitere Wirkung des Reliefs wird an Gebirgen erkennbar. Hier nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe über Normalnull (NN) zu. Beispielsweise verringert sich die Windgeschwindigkeit von der deutschen Nordseeküste zum Binnenland hin zunächst. Dann aber, mit aufsteigendem Mittelgebirge, nimmt diese Geschwindigkeit wieder zu (Gerth & Christoffer 1994, Kaltschmitt & Fishediek 1995). Langjährige Messungen des Deutschen Wetterdienstes belegen eine Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe über NN in Hessen (HLUG_b 2003).

Grundsätzlich vergleichbar mit der vorgenannten Erfahrung ist auch die Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe über Grund unabhängig von der Höhe über NN (Seifert 1990, Albers 1997). In der Windenergiepraxis wird dieses Phänomen genutzt, indem die Nabenhöhe von WEA möglichst hoch gewählt wird.

In Leelagen vermindert sich die an der Luvseite beschleunigte Windgeschwindigkeit. Windkarten dokumentieren dies, indem Tallagen quer zur Hauptwindrichtung eine verminderte Geschwindigkeit des Windes aufweisen (Gerth & Christoffer 1994). Neben der bremsenden Wirkung des Reliefs auf die Windgeschwindigkeit können aber bestimmte Oberflächenstrukturen die Geschwindigkeit des Windes beschleunigen. Die beschleunigende Wirkung von Hängen wird als "speed up" oder Hügeleffekt bezeichnet (VDWI 2003). Geschwindigkeitszunahmen aufgrund eines Hügeleffekts bis zu 80% sind dokumentiert (Salmon et al. 1987, Taylor et al. 1987). Nach dem selben Prinzip wirkt eine Talverengung beschleunigend auf den Wind, wenn der Wind seinen Weg durch diese Enge finden muß. Schließlich nimmt das Relief Einfluß auf lokale Windsysteme. Eine Hangexposition nach Süden kann Auslöser für ein Berg-Tal Wind System sein (Lauer 1995).

2.1.3.3 Reliefbeschichtung

Unter dem Begriff Reliefbeschichtung werden jenen Strukturen zusammengefaßt, die aufgrund anthropogener Landnutzung oder natürlicher Landschaftsgenese dem abiotischen Relief aufsitzen. Hierzu zählen auch Erscheinungen an der Erdoberfläche, die aufgrund abiotischer Prozesse entstanden sind. Beispiele dafür sind Ascheregen aus Vulkanausbrüchen, Oxidationsschichten oder Schnee.

Die anthropogene Landnutzung prägt das Relief in Mittelhessen stark. Bei der Berechnung von Windgeschwindigkeiten findet sich die Landnutzung in Form des Parameters Rauigkeitslänge wieder. Das ist die Höhe über Grund, ab der die Windgeschwindigkeit auf 0 m/sec abgebremst wird. Über Wasserflächen wird diese Größe z_0 mit 0,0001 Meter festgelegt. Über Städten beträgt z_0 einen Meter (Troen & Peterson 1989).

Gebäude oder Wälder bilden Hindernisse, welche den Wind verlangsamen (Gasch 1996). Hindernisse verringern die Windgeschwindigkeit auf ihrer Leeseite. Der Geschwindigkeitsabfall hängt von der Porosität des Hindernisses ab, d.h. wie luftdurchlässig das Hindernis ist. Ein Gebäude ist solide und hat keinerlei Porosität, während eine Baumkrone jahreszeitlich unterschiedliche Porositäten aufweisen kann. Der Bremseffekt eines Hindernisses für den Wind steigt mit der Höhe und Länge desselben (VDWI 2003).

2.1.4 Windkarten

Zur Abschätzung des Windenergiepotentials eignen sich thematische Landkarten, welche die Windgeschwindigkeit an einem geographischen Ort darstellen - sogenannte Windkarten.

Windkarten für Europa wurden von Troen und Peterson (1989) erstellt. Sie dienen als ein erster Anhaltspunkt für die Aufstellung von WEA. Zu ihrer Berechnung wird das Computerprogramm WASP eingesetzt. Dieses paßt insbesondere für die flachen Küstengebiete Dänemarks und Norddeutschlands. Für die Situation in Mittelgebirgslagen eignet es sich weniger (Gerdes et al. 1997). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt eine Windkarte für Deutschland im Maßstab 1:2500000 her. Mit Hilfe eines Statistischen Windfeldmodells (SWM) des DWD lassen sich großmaßstäbliche Windkarten erzeugen. Beispielsweise können so Windkarten für einzelne Bundesländer oder Teile dieser berechnet werden. Diese Windkarten beziehen sich auf eine Standardhöhe von 10 Metern über Grund (Gerth & Christoffer 1994). Für Bayern zeigte sich jedoch, daß die Windkarte des DWD das Windenergiepotential dieses Bundeslandes unterschätzte. So ergaben Vergleichsmessungen, daß die für die Windenergienutzung geeigneten Flächen Bayerns mehr als dreimal so groß sind als in der Windkarte des DWD ausgewiesen (Glas & Keymer 2001).

Die Berechnung von Windkarten mit Hilfe eines Simulationsprogramms hat sich in der Praxis durchgesetzt. Erst durch die Simulation oder eine Modellrechnung über die relevante Fläche lassen sich zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten hochauflösende Windkarten erstellen (Gerth & Christoffer 1994).

2.2 Mittelhessen

Das Bundesland Hessen wird in drei Regierungsbezirke unterteilt. Mittelhessen befindet sich zwischen den Regierungsbezirken Südhessen und Nordhessen. Die Fläche von Mittelhessen ist kleiner als die seiner benachbarten Bezirke. Fünf Landkreise bilden Mittelhessen: Gießen, Lahn-Dill, Limburg-Weilburg, Marburg-Biedenkopf und Vogelsberg. Insgesamt 101 selbständigen Gemeinden gehören dazu. Die drei Städte mit mehr als 50.000 Einwohnern - Gießen, Marburg und Wetzlar - sind sogenannte Sonderstatusstädte, d. h., sie sind zwar kreisangehörige Gemeinden, nehmen aber bestimmte Aufgaben wahr, die in der Regel nur den Landkreisen und kreisfreien Städten übertragen sind (RP_c 2003).

Tabelle 2.3: Kennzahlen für Mittelhessen, Stand 31.12.2002 (RP_c 2003).

Landkreise	Fläche in km²	Einwohner			Einw./km²
		insgesamt	davon Frauen	Ausländer	
Gießen ¹	854,66	254.331	130.006	21.509	298
Lahn-Dill ²	1.066,51	263.043	134.133	23.212	247
Limburg-Weilburg ³	738,44	175.679	89.406	14.744	238
Marburg-Biedenkopf ⁴	1.262,56	253.500	129.085	24.577	201
Vogelsberg ⁵	1.458,97	118.475	59.693	4.917	81
Mittelhessen ^A	5.381,14	1.065.028	542.323	88.959	198

Kreisstädte: ¹ Gießen, ² Wetzlar, ³ Limburg, ⁴ Marburg, ⁵ Lauterbach

^A Sitz des Regierungspräsidiums für Mittelhessen ist Gießen.

Landschaftlich wird Mittelhessen geprägt von Höhenzügen im Westen und im Osten. Der zentrale Teil der Region befindet sich relativ zu den vorgenannten in einer Senke. In dieser Senke befinden sich die größten Städte der Region an der Lahn. Dazu zählen die Städte Marburg, Gießen, Wetzlar. Mehrere Beckenlandschaften sind hier zu finden. Nach Süden senkt sich Mittelhessen zur Wetterau hin, eine der fruchtbarsten Agrarlandschaften Hessens. Die Lahn entwässert in Richtung Südwesten und schneidet sich dabei durch den Westerwald (Schulze 1982).

Die Höhenlagen im Westen und Osten der Region weisen klimatisch rauhere Bedingungen, mit höheren Windgeschwindigkeiten und Niederschlägen auf, als der zentrale Teil Mittelhessens. Diese naturräumliche Benachteiligung führte wesentlich zu der unterschiedlichen ökonomischen Entwicklung dieser drei Teilgebiete Mittelhessens. Im Osten befindet sich mit dem Vogelsberg das größte erloschene Vulkanmassiv Mitteleuropas, das mit dem 774 Meter hohen Taufstein den höchsten Punkt Mittelhessens innehat. Wälder und offene Flächen mit Hecken wechseln sich hier ab (RP_b 2003).

Nördlich von Marburg liegt der Burgwald, eines der größten zusammenhängenden Waldgebiete Hessens. Östlich davon folgt in Richtung Alsfeld eine hügelige Landschaft. Nordwestlich von Marburg steigt das weniger zugängliche, manchmal schroffe Lahn-Dill-Bergland an, das als Ausläufer des Rheinischen Schiefergebirges zu werten ist (Felix-Henningsen 2000, Weyl 1982).

Nordwestlich von Wetzlar verläuft das Dilltal, welches in früheren Zeiten durch Eisenverarbeitung Industriearbeitsplätze bot. Inzwischen ist diese Einkunftsquelle versiegt (Braun et al. 1998). Westlich von Wetzlar wendet sich das Lahntal den Städten Weilburg und Limburg zu.

Die Hochflächen zwischen diesem unteren Lahntal und dem oberen Dilltal im Norden gehören zum Westerwald; sie sind aus vulkanischem Gestein aufgebaut und von eigentümlichen landschaftlichen Charakter. Das Bergland südlich der unteren Lahn wird bereits von den Taunusausläufern geprägt (RP_b 2003, Schulze 1982).

2.3 Systemanalyse

Die Vorteile der computergestützten Berechnung von Windkarten wurden im Kapitel 2.1 benannt. Sie setzt allerdings eine gut durchdachte Herangehensweise voraus. Eine solche bietet die Systemanalyse, die für die Untersuchung komplexer Zusammenhänge besonders geeignet ist.

Systeme setzen sich zusammen aus einer Menge von Objekten, welche miteinander in Beziehung stehen (Hall & Fagen 1956). Ein **Objekt** (Komponente, Teil) wiederum ist die grundlegende Einheit von Systemen. Kennzeichnend für ein Objekt ist dessen Erscheinungsbild und seine Handlungsfähigkeit. Anderen Autoren ist diese Definition zu unverbindlich und sie fordern daher, daß die Art der Beziehungen zwischen Objekten bekannt sein muß, um ein System darzustellen. Außerdem besitze jedes System eine spezifische Funktion (Shannon 1975, Teng 1981). Damit wird der Systembegriff nahe an das Ökologieverständnis von Odum (1999) herangeführt. In den mathematischen Wissenschaften dagegen wird ein System als Ganzheit gesehen, die aus beliebig vielen Elementen besteht, welche auch mehrfach auftreten können. In dieser Hinsicht unterscheidet sich ein System von einer Menge, wo Elemente nur ein einziges Mal angeführt werden (Heuser 1991). Eine Kennzeichnung der Beziehungen erfolgt hier allenfalls über die gemeinsame Systemgrenze. Gemäß dieser Auffassung ist ein System sehr allgemein gefaßt.

Die **Systemanalyse** ist eine Technik, um komplexe Zusammenhänge zu untersuchen. In deren Verlauf erfolgt die Modellbildung (Haendle & Jensen 1974, Jeffers 1978, Kranz & Hau 1980). Das Modell ist dann in der Lage, das untersuchte System angemessen wiederzugeben. Ein Modell ist ein reduziertes Abbild der Wirklichkeit (Braun 2002).

Man unterscheidet zwischen dem formalen **Modellverständnis** der Mathematik und der theoretischen Informatik sowie dem naiv-realistischen Modellverständnis der anwendungsorientierten Wissenschaften (Wedekind et al. 1998). Beginnend bei einem Axiomensystem gelangt man zu einem formalen Modell, indem dieses System interpretiert, das heißt mit Realisierungen belegt wird. Weniger formal sieht das naiv-realistische Verständnis Modelle. Ausgehend von einem umfänglichen System erfolgt dessen Vereinfachung zu einem Modell. Dieses enthält jene Teile, die für die Fragestellung wichtig sind (Wedekind et al. 1998). Bei beiden Sichtweisen wird die Reduktion eines Vorbildes oder Musters vorgenommen. Modelle sind somit die Vereinfachung bestehender Systeme oder komplexer Gegebenheiten mit dem Ziel diese zu verstehen oder zu handhaben (Bratley et al. 1987, Rykiel 1996). Aufgrund der Komplexität von Ökosystemen eröffnet sich gerade in der Ökologie ein großes Einsatzfeld für die Systemanalyse und Modellierung (Jeffers 1978). Auch geographische Fragestellungen eignen sich in besonderem Maße für die Systemanalyse, da eine Fülle von Geoinformationen verarbeitet werden muß. Typischerweise ist das Werkzeug der Wahl in diesem Bereich das Geographische Informationssystem, kurz GIS (Eastman 1995).

3 Material und Methoden

3.1 Material

Das eingesetzte Material unterteilt sich in Rohstoffe (Daten, Information, usw.) sowie Werkzeuge (z.B. Hardware, Software).

3.1.1 Daten, Information, Wissen (Rohstoffe)

Erst mit Hilfe der Geo- und Wetterdaten konnten die Untersuchungen begonnen werden.

3.1.1.1 Geodaten

Für die Ermittlung des Windenergiepotentials spielt das Relief eine erhebliche Rolle. Um dessen Bedeutung für die Windgeschwindigkeit zu analysieren, wird ein Geländemodell zugrunde gelegt, daß Mittelhessen in 40m x 40m Raster auflöst. Diese elementaren Geodaten werden im weiteren Text auch als Pixel bezeichnet.

Tabelle 3.1: Geodaten als Grundlage für die Ermittlung des Windenergiepotentials in Mittelhessen.

<i>Nr.</i>	<i>Kategorie</i>	<i>Spezifizierung</i>	<i>Verwendung</i>	<i>Quelle</i>
1	Geländemodell	40m x 40m (DGM25)	Rasterlayer	HLVA ¹
2	Politische Grenzen	Regierungsbezirks-, Kreisgrenze	Vektorlayer	HLVA ¹
3	Siedlungen	Bestand, Planung	Rasterlayer	RP Giessen ²

¹ Hessisches Landesvermessungsamt, Postfach 3249, 65022 Wiesbaden.

² Regierungspräsidium Giessen, Landgraf Philipp Platz 3, 35390 Giessen.

Die Beschaffung der Geodaten erfolgt über das Institut für Geographie, Justus-Liebig-Universität. Siehe auch Kapitel 3.2.1 und Anhang Kapitel 8.2.

3.1.1.2 Wetterdaten

Voraussetzung für die Windenergieerzeugung ist eine nutzbare Windgeschwindigkeit. Daher sind Klimadaten zu Windgeschwindigkeit, Windvarianz und Windrichtung für die Bestimmung des Windenergiepotentials in Mittelhessen notwendig.

Entsprechende Daten stehen auf der Website des HLUG zur Verfügung. Genutzt werden davon die Angaben zur mittleren Windgeschwindigkeit hessischer Wetterstationen und deren Höhe über NN. Weitere Wetterdaten entstammen dem European Wind Atlas (Troen & Petersen 1989), beispielsweise die Wetterdaten für die DWD Stationen Frankfurt und Hof-Hohensaas. Beide Stationen liegen dem Untersuchungsgebiet Mittelhessen am nächsten. Ihre Wetterdaten beruhen auf wenigstens zehnjährigen Meßreihen.

Der Deutsche Wetterdienst wird nicht stärker einbezogen. Private Wetterdatenanbieter besitzen keine geeigneten Wetterdaten.

3.1.1.3 Informationen und Wissen

Verwendete Informationen und Wissen sind in der Literaturübersicht und dem Literaturverzeichnis angegeben. Im Übrigen fließen Diskussionen, Interpretationen und Gespräche zur Thematik und benachbarten Fachgebieten in diese Arbeit ein.

3.1.2 Werkzeuge

Als Werkzeuge dienen Gegenstände aus den Bereichen Hardware und Software. Weitere Werkzeuge gehören zur Gruppe der Standardbüroartikel.

3.1.2.1 Hardware

In dieser Arbeit werden zwei Arbeitsplatzrechner verwendet. Für Berechnungen, Internetrecherchen und Dokumentationen wird ein PC Pentium II (Typ Compaq Deskpro) mit 128 KB RAM und einer 6 GB Festplatte der Firma (Hewlett-Packard Company, 3000 Hanover Street, Palo Alto, CA 94304-1185 USA) genutzt. Die Arbeiten an den Geodaten und Programmentwicklungen erfolgen auf einem Pentium III Rechner mit 256 KB RAM und einer 40 GB Festplatte. Dieser Rechner wurde von der Firma UniComp in Giessen (UniComp, Lindengasse 6, 35392 Giessen) zusammengebaut.

Ausdrucke liefern über einen Drucker Hewlett-Packard (HP) Deskjet 520 oder HP Deskjet 1220c (Hewlett-Packard Company, 3000 Hanover Street, Palo Alto, CA 94304-1185 USA). Für Farbausdrucke eignet sich lediglich der letztgenannte Drucker.

Als Taschenrechner kommt ein CASIO fx-991s zum Einsatz (CASIO EUROPE GmbH, Bornbarch 10, 22848 Norderstedt, Deutschland).

3.1.2.2 Software

Das wichtigste Softwaretool ist das Geographische Informationssystem IDRISI für Windows in seiner 32 bit Version, Release Two. IDRISI wird von der amerikanischen Firma Clarklabs entwickelt und verkauft. (950 Main Street Worcester, MA 01610 - 1477, USA)

Die Programmierung von Utilities zur Bearbeitung der Geodaten erfolgt mit Turbo Pascal für Windows 1 aus dem Hause Borland (100 Enterprise Way Scotts Valley, CA 95066-3249, USA).

Für die statistischen Berechnungen reicht Excel 97 der Firma Microsoft (Microsoft Corporation, One Microsoft Way, Redmond, WA 98052-6399, USA).

Zur Ausarbeitung und Gestaltung der vorliegenden Arbeit genügt MS Office 97 Professional von der Firma Microsoft.

3.2 Methoden

Methodisch geprägt wird die vorliegende Arbeit durch Modellentwicklung und Simulation. Beide Vorgänge sind Teile der Systemanalyse. Voraussetzung für die Systemanalyse ist die Bereitstellung des Untersuchungsobjekts (Kapitel 3.2.1 Generierung des Untersuchungsobjekts). Danach beginnt die Systemanalyse (Kapitel 3.2.2 Systemanalyse). Abschließend wurden Ergebnisse visualisiert und ausgewertet (Kapitel 3.2.3 Auswertung).

3.2.1 Generierung des Untersuchungsobjekts

Zunächst sind die Geodaten des Landesamtes zusammenzufügen und zu verifizieren. Es handelt sich zunächst um 23 Dateien bzw. Ausschnitte im *.xyz Format, das von IDRISI im Vektorformat eingelesen wird. Dabei treten Probleme insofern auf, als bei den drei östlichsten Dateien ein 40 Meter breiter Streifen fehlt. Ein ähnliches Problem taucht zwischen den beiden südöstlichsten Ausschnitten auf. In beiden Fällen verifiziert ein eigens dafür entwickeltes Pascal Programm *minmax.pas* Fehlstellen in den Dateien (siehe Anhang, Kapitel 8.4). Diese werden dann wieder gefüllt. Die kor-

rigierten Dateien werden erneut an das Gesamtbild der Höhenverteilung in Mittelhessen angefügt.

Nachdem die politischen Grenzen mit den Rasterdaten des Höhenmodells von Mittelhessen verknüpft sind, zeigt sich, daß Teile Mittelhessens von den Geodaten des HLVA nicht mehr dargestellt werden. Im östlichen Bereich des HLVA Datensatzes reichen die Daten weit über die Grenzen Mittelhessens hinaus. Die fehlenden Daten stellt das HLVA nach 2 Monaten zur Verfügung. Das Höhenmodell von Mittelhessen wird aus 25 Dateien erneut zusammengefügt (siehe Anhang, Kap. 8.2).

Das Untersuchungsgebiet besitzt an seiner westlichsten Stelle einen Rechtswert von 3 424.000 m und an der östlichsten Stelle den Rechtswert 3 560.000 m. Der südlichste Hochwert beträgt 5.560.000 m, der nördlichste 5.660.000 m.

Als Referenzsystem dient Gauß-Krüger (siehe Anhang, Kap. 8.1). Nach der Verarbeitung mit IDRISI entsteht ein Rasterbild Mittelhessens von ca. 11,6 MB. Das bedeutet eine Datenreduktion auf 5,6 % der Ausgangsdaten und hat zur Folge, daß zügig gearbeitet werden kann (siehe Anhang, Kap. 8.2).

3.2.2 Systemanalyse

Einzelne Stufen der Systemanalyse entfallen auf verschiedenen Kapitel dieser Arbeit. Zur Verdeutlichung dieser Zusammenhänge dient die nachfolgende Übersicht.

Tabelle 3.2: Darstellung einzelner Schritte der Systemanalyse (SA) mit den zugehörigen Kapiteln in der vorliegenden Arbeit. In den ersten vier Spalten angegebene Buchstaben bezeichnen Teilprozesse der SA. Beobachtung und Produktion sind der SA teilweise vor- bzw. nachgelagert.

				Schritte der Systemanalyse	Zugehörige Kapitel
W				Beobachtung	Kapitel 1, 2
W	H			Systemwahrnehmung, Identifikation	Kapitel 1, 2
	H			Systembeschreibung, Definition	Kapitel 1, 2
	H	F+E		Systemgrenzen	Kapitel 3.2
	H	F+E		Datenaufbereitung	Kapitel 3.1
	H	F+E		Modellierung	Kapitel 4.1
		F+E	P	Evaluierung	Kapitel 3.3, 4, 5
			P	Produktion	Kapitel 4, 5, 8

W = Wahrnehmung; H = Erkenntnis; F+E = Forschung und Entwicklung; P = Produktion.

Systemgrenzen: Die Energie im Wind ist die potentiell nutzbare Kraft, welche der Rotor einer Windmühle ausbeuten kann. Es hängt vom Wirkungsgrad der jeweiligen Windkraftanlage ab, wieviel von dieser Kraft in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Hier wird untersucht wie groß dieses Potential an jedem Ort in Mittelhessen in einem Pixel ist. Die technische Effizienz von Windmühlen und deren Betrieb liegen außerhalb der Systemgrenzen dieser Arbeit. Eine zeitliche Systemgrenze wird nicht gezogen.

Modellierung - Modellskizze: Das Windenergiepotential P in Watt pro m^2 Rotorfläche an irgendeinem Punkt $K(x,y)$ in Mittelhessen wird im Wesentlichen von den folgenden Faktoren bestimmt:

1. **Windgeschwindigkeit V_{Wind}** , wobei diese abhängt von der Höhe über NN (a.s.l), Höhe über Grund (a.g.), Hangneigung, Hangrichtung, Landnutzung;
2. **Windvarianz s_{Wind}** ;
3. **Luftdichte d_K** .

Somit stellt sich das zu analysierende System Windenergiepotential in Mittelhessen folgendermaßen dar:

$$P_K = V_{Wind} \cdot s_{Wind} \cdot d_K$$

oder

$$P = f(V, s, d).$$

Modellierung - Prototyping: Aufgrund der obigen Systemdefinition, werden Teilausschnitte aus den Dateien des HLVA gebildet, um an diesen Modellvorstellungen zu testen. Zum Ausschneiden von Flächen dient das Pascal Programm *extract.pas*, welches ebenfalls im Rahmen dieser Diplomarbeit als Utility entstand (siehe Anhang, Kap. 8.3). Die verwendeten Teilausschnitte entsprechen der Topographischen Karte 5221 Alsfeld im Maßstab 1:25000 und zwei Teilausschnitten dieser Karte von einem Quadratkilometer Größe (HLVA 1988). Der erste Teilausschnitt befindet sich im Süden der Kernstadt von Alsfeld, Kinderspielwiese, der zweite Teilausschnitt umfaßte das Altbauggebiet des Ortsteiles Altenburg.

Nachdem das Verhalten obiger Modellvorstellungen im Kleinen evaluiert ist, wird das geeignetste Modell gewählt und auf den gesamten Bereich von Mittelhessen angewendet. Diese Übertragung von einer kleinen auf eine große Landfläche - Upscaling - erscheint statthaft, weil deutliche Wechselwirkungen zwischen den Modellfaktoren nicht zu erwarten sind.

3.2.3 Auswertung

Für quantitative Auswertungen oder aber Berechnungen wird MS Excel 97 verwendet. Das Geographische Informationssystem IDRISI veranschaulicht die Analyseergebnisse. Flächenanteile der visualisierten Geodaten beruhen auf Schätzungen. Nacharbeiten für die Aufbereitung zu dieser Diplomarbeit erfolgen mit Powerpoint 97 oder MS Draw bzw. MS Photo Editor.

4 Ergebnisse

Zunächst wird das grundlegende Modell WEPIM zur Bestimmung des Windenergiepotentials in Mittelhessen hergeleitet (Kap. 4.1). Danach werden die geographischen Grundlagen des Windenergiepotentials gezeigt (Kapitel 4.2). Es schließt sich die daraus resultierende Windgeschwindigkeit im Untersuchungsgebiet an (Kapitel 4.3). Aus der Windgeschwindigkeit leitet sich schließlich das Windenergiepotential von Mittelhessen ab (Kapitel 4.4). Abschließende erfolgt die Erarbeitung des Workflows, der zu den Windleistungskarten führt (Kapitel 4.5).

4.1 Modellentwicklung

Um das Windenergiepotential in Mittelhessen zu bestimmen, wird das Modell WEPIM entwickelt, da eine Totalerfassung oder eine Beprobung dieses Potentials finanziell und personell nicht zu leisten war. WEPIM gliedert sich in Teilmodellgruppen und diese wiederum in Teilmodelle.

Der Energiegehalt des Windes errechnet sich als Watt pro m². Damit wird der Situation Rechnung getragen, daß Windmühlen mit ihren Flügeln eine bestimmte Fläche überstreichen und sich daraus die Leistung einer WEA bemißt. Die entsprechende Formel lautet ohne Berücksichtigung des Jahresverlaufs der Windgeschwindigkeit:

$$P_K = 0,5 * V_{\text{Wind}}^3 * 1,225 \text{ kg/m}^3 \quad (4.1).$$

In dieser Formel steht V_{Wind} für die Windgeschwindigkeit in m/sec an einem beliebigen Punkt K in Mittelhessen mit einer Höhe bis 100 m über Grund. Die Konstante 1,225 entspricht der Luftdichte trockener Luft bei normalem Luftdruck auf Meereshöhe und 15° Celsius Temperatur.

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Komponenten des Modells beschrieben. Sie entsprechen den Vorgaben aus dem Kapitel 3.2.2 Systemanalyse.

4.1.1 Teilmodellgruppe Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit wird in der standardisierten Klimadokumentation in Metern pro Sekunde für eine Meßhöhe von 10 Metern über Grund angegeben. Bei der Aufzeichnung des Klimatelements Wind ist darauf zu achten, daß die wertgebenden Meßfühler nicht durch Hindernisse in deren näheren Umgebung beeinflußt werden.

4.1.1.1 Teilmodell Höhe über NN (a.s.l)

Die Windgeschwindigkeit ist eine Funktion der Höhe über Normalnull - NN - oder über Meeresspiegel, above sea level - a.s.l. - und nimmt mit der Höhe zu. Aufgrund von Daten des DWD für Hessen (HLUGa 2003) wird folgende Funktion ermittelt:

$$V_{\text{asl}} = 0,00000003433h^3 - 0,00004962782h^2 + 0,02387270189h \quad (4.2).$$

Die Windgeschwindigkeit V_{asl} ist danach abhängig von der Höhe über NN. Offenbar weil in dieser Berechnung lediglich Daten aus Hessen berücksichtigt sind, kann ein hohes Bestimmtheitsmaß auch ohne Berücksichtigung einer Nord-Süd bzw. West-Ost Abnahme der Windgeschwindigkeit erreicht werden (Gerth & Christoffer 1994). Die Darstellung dieses Teilmodells zeigt eine fehlende Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe bei etwa 300 bis 600 Metern über NN.

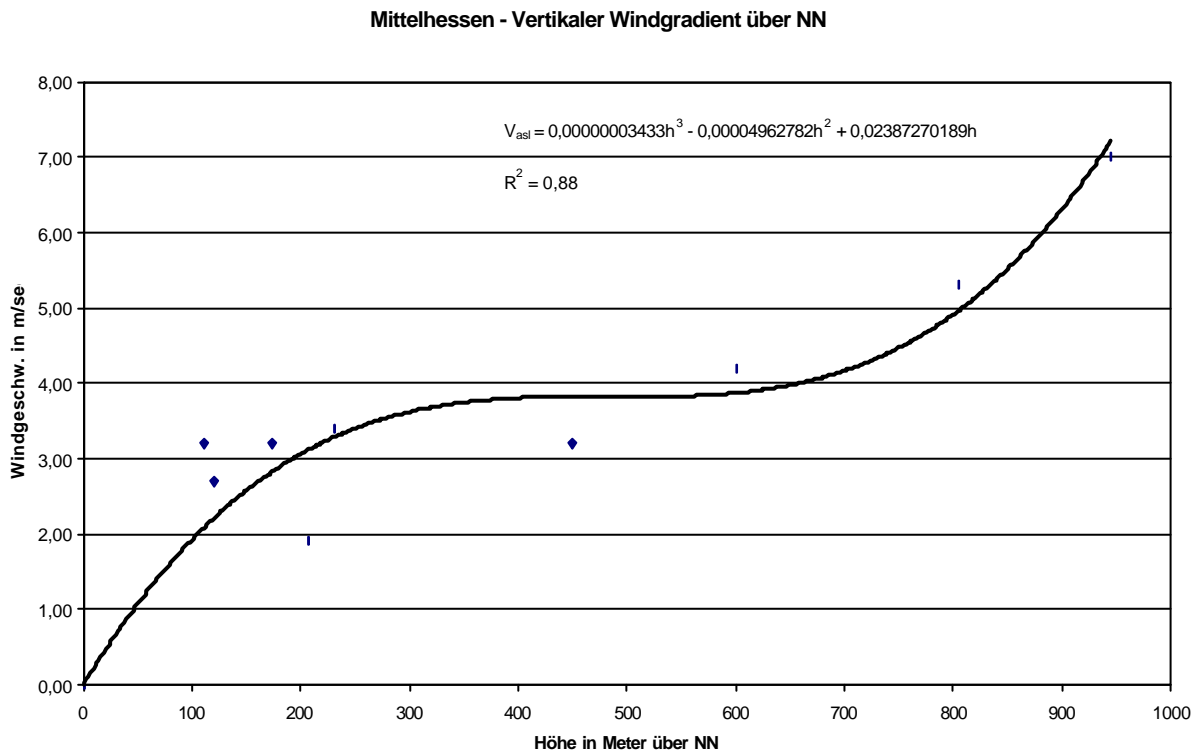


Abbildung 4.1: Vertikaler Windgradient in Mittelhessen aufgrund langjähriger Meßreihen von acht Wetterstationen in Hessen (HLUGa 2003).

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,88 ist die Schätzung der Regression der Windgeschwindigkeit auf die Höhe über Meeresspiegel gut.

Um eine Abnahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe im Bereich 300 - 600 Meter auszuschließen, wird ein Hilfspunkt eingeführt. Dieser hat die Werte $h = 600$ m und $V = 4,2$ m/sec. Außerdem setzt dieses Teilmodell voraus, daß die Windge-

schwindigkeit direkt an der Erdoberfläche 0 m/sec beträgt. Mit diesen Randbedingungen fließt das Teilmodell Höhe über NN in die flächendeckende Berechnung der Windgeschwindigkeiten von Mittelhessen ein.

4.1.1.2 Teilmodell Höhe über Grund (a.g.)

Eine Zunahme der Windgeschwindigkeit über Grund wird zusätzlich berücksichtigt. Das entsprechende allgemeine Modell lautet:

$$V_{ag} = a \cdot \ln(h) \quad (4.3)$$

Die Windgeschwindigkeit V_{ag} über Grund ist abhängig von einer Konstanten a sowie dem natürlichen Logarithmus der Höhe h am Punkt $K(x,y)$ in Mittelhessen. Eine Parametrisierung anhand von Daten aus dem European Windatlas (Troen & Petersen 1989) ergibt die folgende Beziehung, siehe auch Abbildung 4.2:

$$V_{ag} = 0,8351 \cdot \ln(h) + 2,5718 \quad (4.4)$$

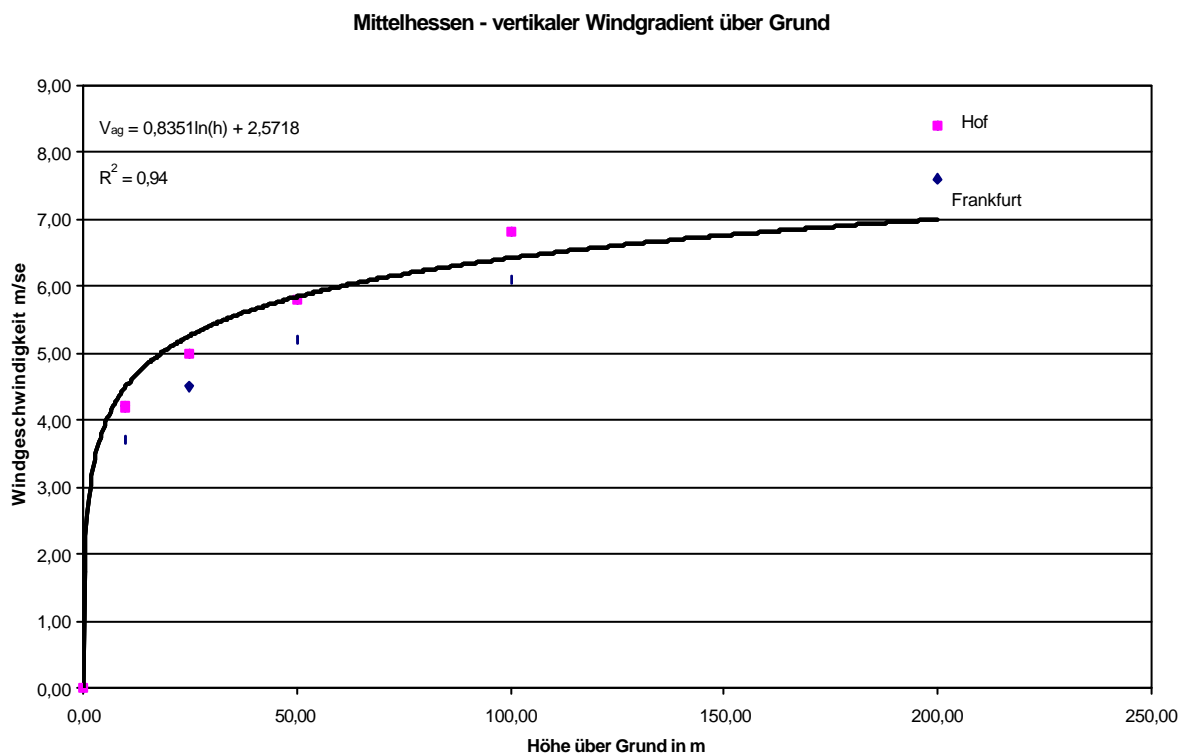


Abbildung 4.2: Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe über Grund.

Als Definitionsbereich sind bei diesem Teilmodell Höhen ab 0,05 m zulässig. Für die Parameterbestimmung finden Werte der Wetterstationen Frankfurt (UTM E: 471351, N: 5542525, 111m a.s.l.) und Hof (UTM E: 705273, N: 5577929, 567m a.s.l.) Ver-

wendung, die in etwa auf dem gleichen Breitenkreis liegen.

Das Bestimmtheitsmaß dieser Regression liegt bei 0,94 sehr hoch. Zugleich entspricht das allgemeine Modell (4.3) den Annahmen des DWD. In niederen Höhen überschätzt das Modell die Bedeutung der Höhe über Grund für die Windgeschwindigkeit. Bei großen Höhen unterschätzt das Modell. Im Bereich von 100 m eignet sich das Modell sehr gut. Dies ist eine maßgebliche Höhe für diese Untersuchung.

4.1.1.3 Teilmodell Hangneigung

Grundlegend bei diesem Teilmodell ist die Vorstellung, daß Windgeschwindigkeiten direkt proportional mit der Hangneigung zunehmen, solange diese ein Maximalmaß nicht übersteigt. Dieses Maß beträgt 25°. Hangneigungen über diesem Wert fallen aus der weiteren Analyse (Braun 1994).

Der Hügелеffekt läßt sich anhand der Daten und dem Wissen aus dem "Askervein Hill" Projekt (Salmon et al. 1987) sowie dem European Windatlas parametrisieren (Troen & Petersen 1989). Eine Faustregel für den Hügелеffekt besagt:

$$dS = 2 * h/L \quad (4.5)$$

Dabei steht **dS** für das speed up eines Hügels. Der Wert **h** ist die Höhe einer Erhebung und **L** ist die halbe Länge dieses Hügels in der maßgeblichen Windrichtung. Unter der Annahme von geometrisch idealen Bedingungen läßt sich h aus dem DGM 25 ableiten. Zur Veranschaulichung dient folgende Grafik:

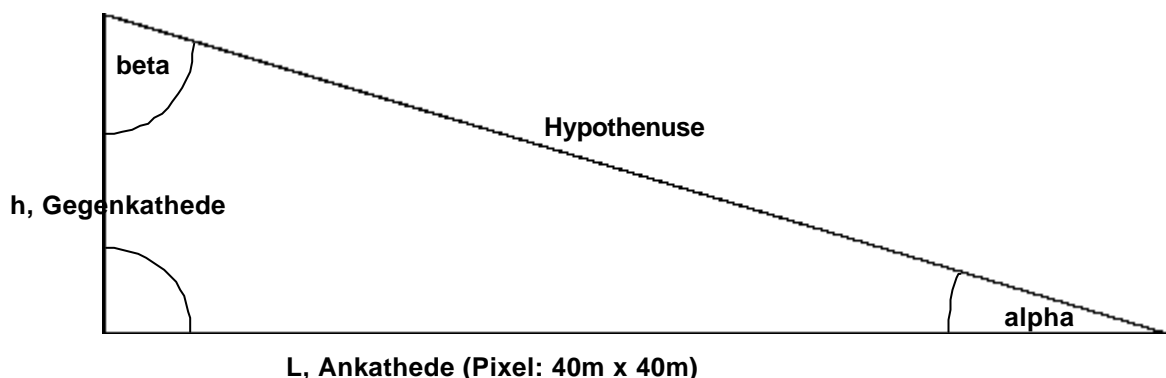


Abbildung 4.3: Berechnung der Größe h mit Hilfe der ebenen Trigonometrie.

Die Größe L ist bekannt als Pixellänge der Auflösung des DGM 25. Der Winkel alpha ergibt sich aus der Hangneigung für jedes einzelne Pixel aus dem DGM 25 mit Hilfe von IDRISI. Damit sind drei Winkel sowie eine Seitenlänge dieses Dreiecks bekannt

(Abb. 4.3). Die Höhe h des elementaren Pixels ergibt sich damit als Wert der Gegenkathete. Auf diese Weise errechnen sich alle Eingangsgröße von Gleichung (4.5). In der Folge lassen sich für alle Pixel des DGM 25 so die Werte eines idealen Hügелеffekts bestimmen und darstellen. Das Teilmodell Hügелеffekt lautet:

$$dS = 0,0002 \alpha^2 + 0,0002 \alpha \quad (4.6).$$

Das speed up, dS , ist abhängig von der Hangneigung α , siehe auch Abb. 4.4.

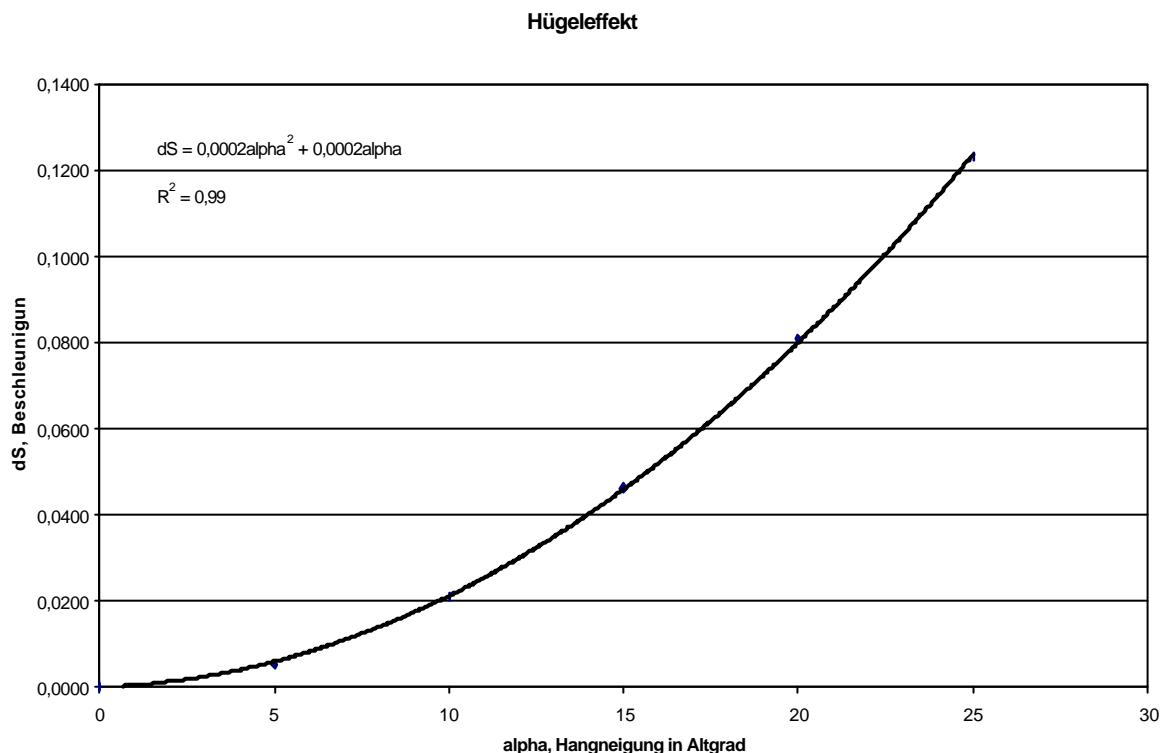


Abbildung 4.4: Zusammenhang zwischen Beschleunigung der Windgeschwindigkeit aufgrund der Neigung des angeströmten Hanges.

Ein Korrekturfaktor zu diesem Hügелеffekt ist notwendig, da ansonsten dieser nur von der Hangneigung abhängig wäre, nicht aber von der Hanglänge oder -höhe. So zeigen die Untersuchungen des Askervein Projekts, das am Hangfuß das speed up geringer ist als oben am Hang. Für diese Arbeit gilt daher folgender Korrekturfaktor ε_s :

$$\varepsilon_s = h_p / H_A \quad (4.7)$$

ε_s hängt ab von dem Verhältnis der Höhe h_p in jedem 40m x 40m Pixel von Mittelhessen zu einer Referenzhöhe H_A von 116m. Diese stammt aus dem Askervein Projekt und beschreibt die Höhe des Gipfels von Askervein über Grund.

4.1.1.4 Teilmodell Hangrichtung

Eine weitere Annahme dieser Arbeit lautet, daß Leeturbulenzen oder Schatteneffekte die Windgeschwindigkeit nur dann beeinflussen, wenn die Hangneigung über 25° Grad liegt. Ansonsten reißt die Windströmung nicht ab, Verminderungen der Windgeschwindigkeit wegen Leeturbulenzen sind nicht zu erwarten. Flächen mit Neigungen über 25° werden nicht berücksichtigt. Daraus folgt, daß in Mittelhessen die Hangrichtung keine Bedeutung für das Windenergiepotential besitzt.

4.1.1.5 Teilmodell Landnutzung

Für die Landnutzung in Mittelhessen wird eine einheitliche Rauigkeitslänge angenommen. Diese beträgt $z_0 = 0.03$. Das entspricht offenem, landwirtschaftlich genutztem Gelände.

4.1.2 Teilmodellgruppe Windvarianz

Die Windstärke unterliegt einer zeitlichen Varianz. Diese kann mittels einer Weibullverteilung beschrieben werden. In der Prognose des Windenergiepotentials werden die entsprechen Werte aus dem Europäischen Windatlas berücksichtigt.

4.1.3 Teilmodellgruppe Luftdichte

Als maßgebliche Luftdichte für die Bestimmung des Windenergiepotentials eines Pixels in Watt pro m^2 wird eine Normdichte von $1,225 \text{ kg/m}^3$ in Meereshöhe und 15° Celsius Lufttemperatur angenommen.

4.1.4 Teilmodellgruppe Windleistung

Der Energiegehalt des Windes errechnet sich direkt aus einer mittleren Windgeschwindigkeit oder aus einer Häufigkeitsverteilung verschiedener Windgeschwindigkeitsklassen.

4.1.4.1 Teilmodell Windleistung - mittlere Windgeschwindigkeit

Dieses Teilmodell wird bereits in Kapitel 4.1, Formel (4.1) zu Beginn beschrieben.

4.1.4.2 Teilmodell Windleistung - variable Windgeschwindigkeit

Nachfolgende Grafik veranschaulicht das Teilmodell, welches die Windleistung korrigiert, die sich aus deren Berechnung über die mittlere Jahresgeschwindigkeit ergibt.

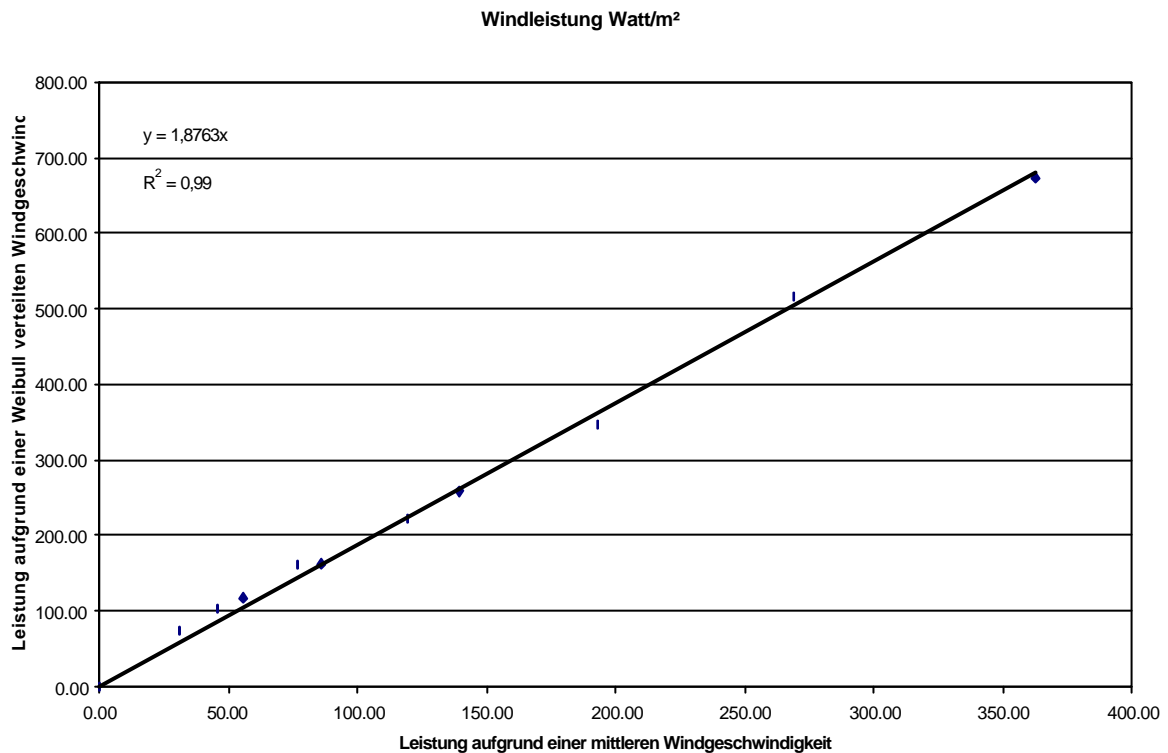


Abbildung 4.5: Korrigierte Windleistung aufgrund von Wetterdaten für die Stationen Frankfurt und Hof-Hohensaas (Troen & Petersen 1989).

Daraus ergibt sich dieses Teilmodell mit

$$y = 1,8763x \quad (4.8).$$

Die Windgeschwindigkeit aufgrund einer weibullverteilten Windgeschwindigkeit, y , ist um ca. den Faktor 1,88 größer, als wenn die Leistung des Windes lediglich basierend auf einer mittleren Windgeschwindigkeit, x , berechnet würde.

4.2 Das Digitale Höhenmodell von Mittelhessen

Mit dem DGM 25 des Hessischen Landesvermessungsamts ist eine sehr hohe Auflösung der Reliefstruktur Mittelhessens möglich. Die Bedeutung des Reliefs für das Windenergiepotential kann daher gut berücksichtigt werden.

4.2.1 Höhenkarte von Mittelhessen

Anhand der aus den Höhendaten gefertigten Landkarte zeichnen sich Strukturen ab, mit denen die Teile Mittelhessen schnell zu kennzeichnen sind (Abb. 4.6).

Im Westen von Mittelhessen finden sich die Höhenzüge des Westerwalds. Diese sinken zu ausgedehnten Bereichen mit geringer Höhe über dem Meeresspiegel ab. Als Reliefstrukturen besonders geringer Höhe gelten das Lahntal sowie die Wetterau. Dieser Bereich geringer Höhe über NN wird nach Osten hin von einer deutlich abgesetzten und einzeln stehenden Struktur abgelöst: dem Vogelsberg. Nach Norden und Osten hin folgt ein Bereich mit bewegtem Relief. Das bedeutet niedrige und hohe Landesteile sind nahe beieinander. Dabei erreichen die Erhebungen mit 450 bis 550 Metern über Normalnull niemals die Höhen des Vogelsbergs. Der zentrale Teil Mittelhessens mit Höhen zwischen 150 und 250 Metern über NN wird also von Höhenlagen eingerahmt. Diese Höhenzüge bewirken eine Beschattung des Zentrums von Mittelhessen. Einzig nach Süden öffnet sich Mittelhessen zur Wetterau hin und damit zur Rheinebene.

Abgesehen von diesen gewölbten Reliefstrukturen finden sich Einschneidungen im Relief, die eine Erosionswirkung des Wassers in Mittelhessen erkennen lassen. Die Entwässerungsstrukturen vom nördlichen und östlichen Vogelsberg sowie der westlichen Rhön führen nach Norden. Ausgehend vom nordwestlichen und westlichen Vogelsberg führen Erosionsrinnen nach Westen zum Lahntal. Südwestlich entwässert der Vogelsberg in die Wetterau. Die Lahn erweist sich als dominanter Entwässerungslauf für das westliche Mittelhessen.

Anhand dieser ersten Reliefbeschreibung lassen sich bereits Vermutungen anstellen, wo günstige und wo ungünstige WEA Standorte sein könnten. So vermutet man günstige Standorte in Bereichen, welche das umgebende Relief deutlich überragen. Westerwald und Vogelsberg, sowie außerhalb Mittelhessen Knüll und Rhön, sollten besonders ökonomische WEA Standorte hervorbringen.

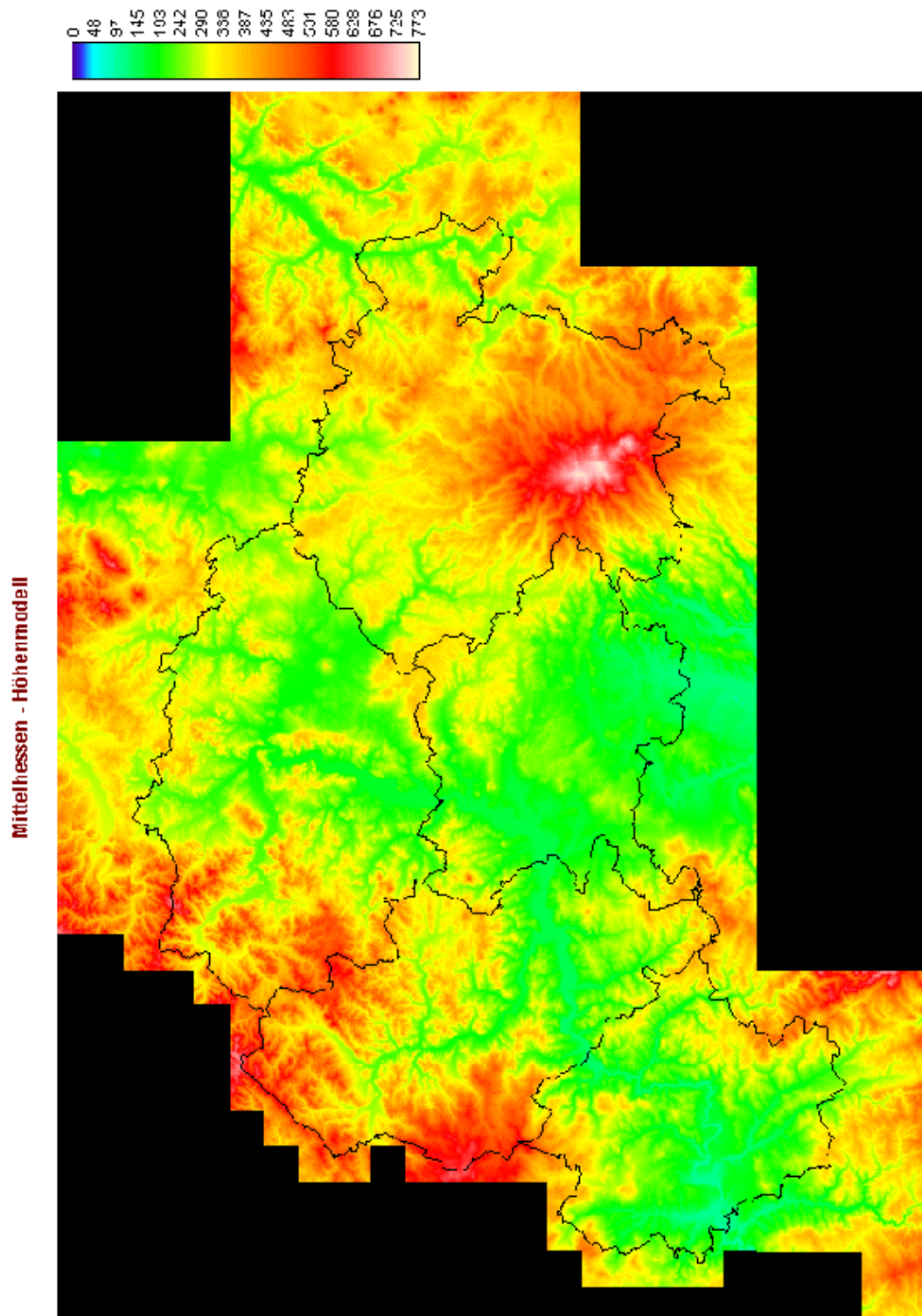


Abbildung 4.6: Höhenmodell von Mittelhessen. Datengrundlage ist das DGM25 des Hessischen Landesvermessungsamtes.

4.2.2 Hangneigungen in Mittelhessen

Hangneigungen haben wegen des Beschleunigungseffekts - speed up - eine besondere Bedeutung für das Windenergiepotential in Mittelhessen.

In diesem Projekt interessieren die Hangneigungen in Mittelhessen unter 25 Altgrad. Die Abbildung 4.7 zeigt, wie selten Hangneigungen über 25 Altgrad sind. Das ist ein Hinweis auf ein sanft gewelltes Relief im Untersuchungsraum. An den Rändern von Flußtälern im westlichen Teil von Mittelhessen finden sich oft Steigungen des Geländes, die über dem Grenzwert von 25° liegen.

Der östliche Teil des Lahn-Dill-Berglands, im Nordwesten von Mittelhessen, weist viele Hangneigungen über 25° auf. Im Vogelsberg sind Hangneigungen über 25° dagegen nicht zu lokalisieren. Das spricht für eine stete Höhenzunahme des Vogelsbergs. Aufgrund dieser geringen Häufigkeit werden Hangneigungen über 25 Grad in dieser Windenergieprognose ignoriert.

Anhand der Abbildung 4.7 sind die Landkreise Mittelhessens gut zu unterscheiden. Der südwestlichste Landkreis ist Limburg-Weilburg. An diesen grenzt der Landkreis Lahn-Dill. Dieser wiederum grenzt nach Nordosten an den Landkreis Marburg-Biedenkopf und im Osten an den Landkreis Gießen. Der östlichste Kreis Mittelhessens ist der Vogelsbergkreis. Alle Landkarten/Geodaten dieser Arbeit sind genordet.

4.2.3 Hangrichtungen in Mittelhessen

Die Ausrichtung von Hängen ist wichtig, wenn energiereiche Winde vornehmlich aus einer bestimmten Himmelsrichtung wehen und das Relief sich aus Steigungen zusammensetzt, die zwar an der Anströmseite erhebliche Beschleunigungen bewirken, auf der Leeseite aber zu Turbulenzen und damit zu Verminderungen der Windgeschwindigkeit führen.

Dieser Aspekt des Reliefs für das Windenergiepotential wird nicht weiter untersucht. Eine bevorzugte Richtung, aus der energiereiche Winde wehen, ist irrelevant, da Hangneigungen über 25° von der weiteren Analyse ausgeschlossen bleiben. Derartige Steigungen der Hänge machen nur einen verschwindend geringen Anteil der Oberfläche Mittelhessens aus. Gleichwohl wird die Analyse der Hangrichtungen interessant, wenn vielversprechende Reliefstrukturen gesucht werden, deren Existenz eine Windbeschleunigung mit sich bringen könnte, wie z.B. Talverengungen in Hauptwindrichtung.

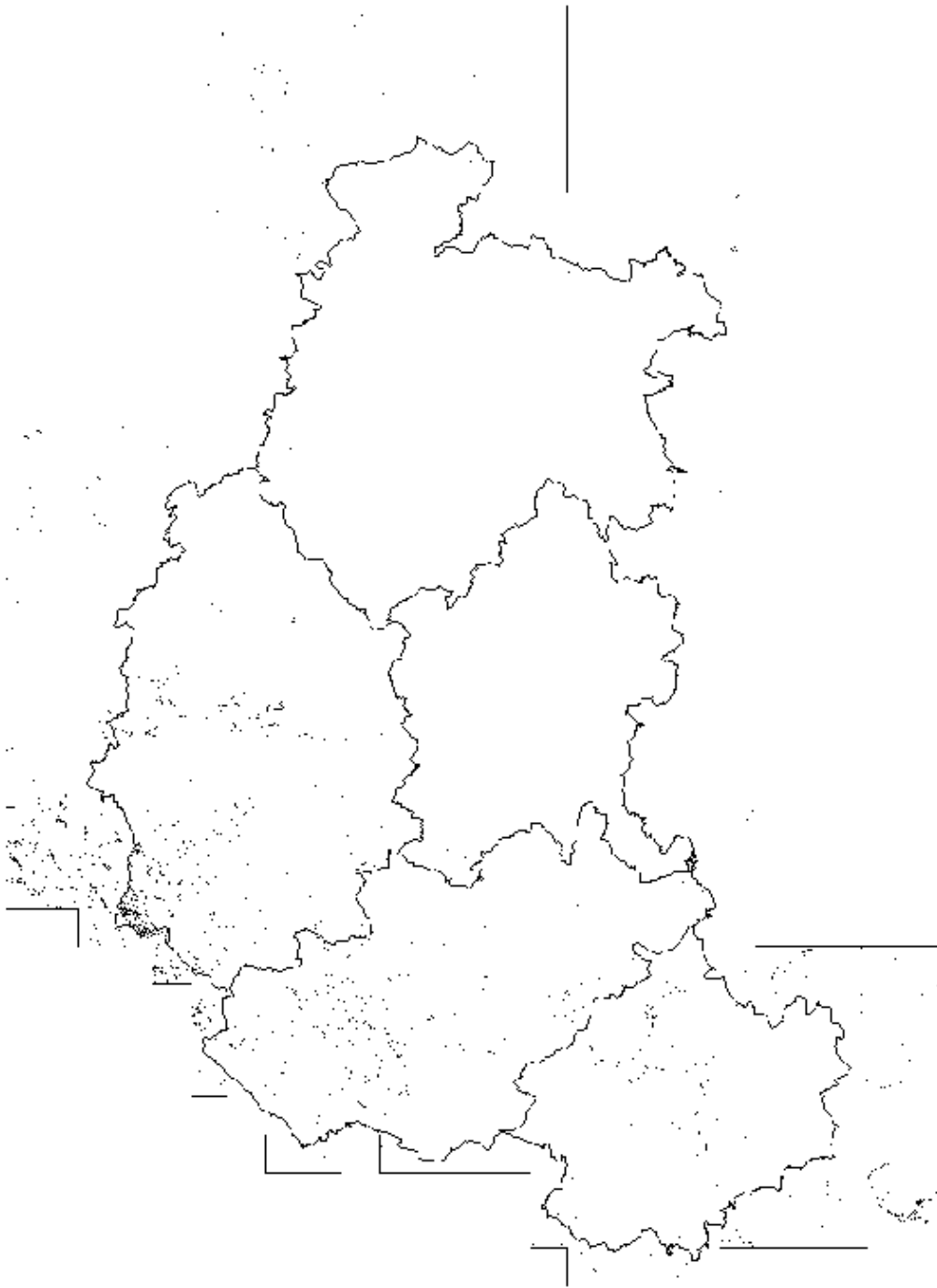


Abbildung 4.7: Hangneigungen über 25 Altgrad in Mittelhessen. Schwarze Punkte sind 40x40 Rasterpunkte, die eine Hangneigung über 25 Grad aufweisen.

4.3 Windkarten von Mittelhessen

Unter Einbeziehung des Reliefs ergeben sich für Mittelhessen unterschiedliche Windkarten, wenn die Randbedingungen variiert werden. Solche Randbedingungen sind Höhe über NN oder Hügelleffekt. Als Grenzwert zur ökonomischen Nutzung der Windenergie dienen 4 m/sec.

4.3.1 Windgeschwindigkeit und die Höhe über dem Meeresspiegel

Die Windleistung eines Standorts ergibt sich aus der vor Ort herrschenden Windgeschwindigkeit (siehe Gl. 4.1). Daher müssen aus der Höhenkarte zunächst die maßgeblichen mittleren Windgeschwindigkeiten abgeleitet werden.

Eine solche Karte ist in Abbildung 4.8 zu sehen. Zunächst fällt auf, daß die deutliche Differenzierung von Mittelhessen, wie sie noch bei den Höhenangaben zu erkennen ist, verschwindet.. Ruft man sich in Erinnerung, daß das Teilmodell für vertikale Windgradienten über NN keine Zunahme der Windgeschwindigkeit im Bereich zwischen 350 bis 600 Metern ausweist, wird dieses Phänomen verstehbar: In dieser Spanne bedingt die Höhenzunahme über NN nicht gleichzeitig ein Zunahme der Windgeschwindigkeit.

Die Benachteiligung der Tallagen bei der mittleren Windgeschwindigkeit wird evident. So liegen diese durchweg unter der Schwelle von 4 m/sec. Der überwiegende Teil von Mittelhessen liegt nach diesem einfachen Modell in diesem Grenzbereich. Eine wirtschaftliche Windenergienutzung kann so weder ausgeschlossen noch bestätigt werden. In der Umgebung des Vogelsberges wird dieser Wert fast immer übertroffen, was die vorzügliche Lage dieses Gebietes für die Windenergienutzung unterstreicht. Das Vulkanmassiv des Vogelsberges ist in Abb. 4.8 aber nur schwach zu erkennen.

Stellt man an dieser Stelle eine Reihung der Landkreise hinsichtlich ihrer Windhöffigkeit auf, so ergibt sich: Am günstigsten für die Energienutzung ist der Vogelsbergkreis. Es folgen der Lahn-Dill-Kreis, der Kreis Marburg-Biedenkopf, der Kreis Limburg-Weilburg und am Ende der Kreis Gießen.

Zur Erinnerung sei angemerkt, daß die hier gefundenen Werte für mittlere Windgeschwindigkeiten sich auf eine Höhe von 10 Metern über Grund beziehen. Das ist auch die Standardhöhe für Windmessungen in Deutschland.

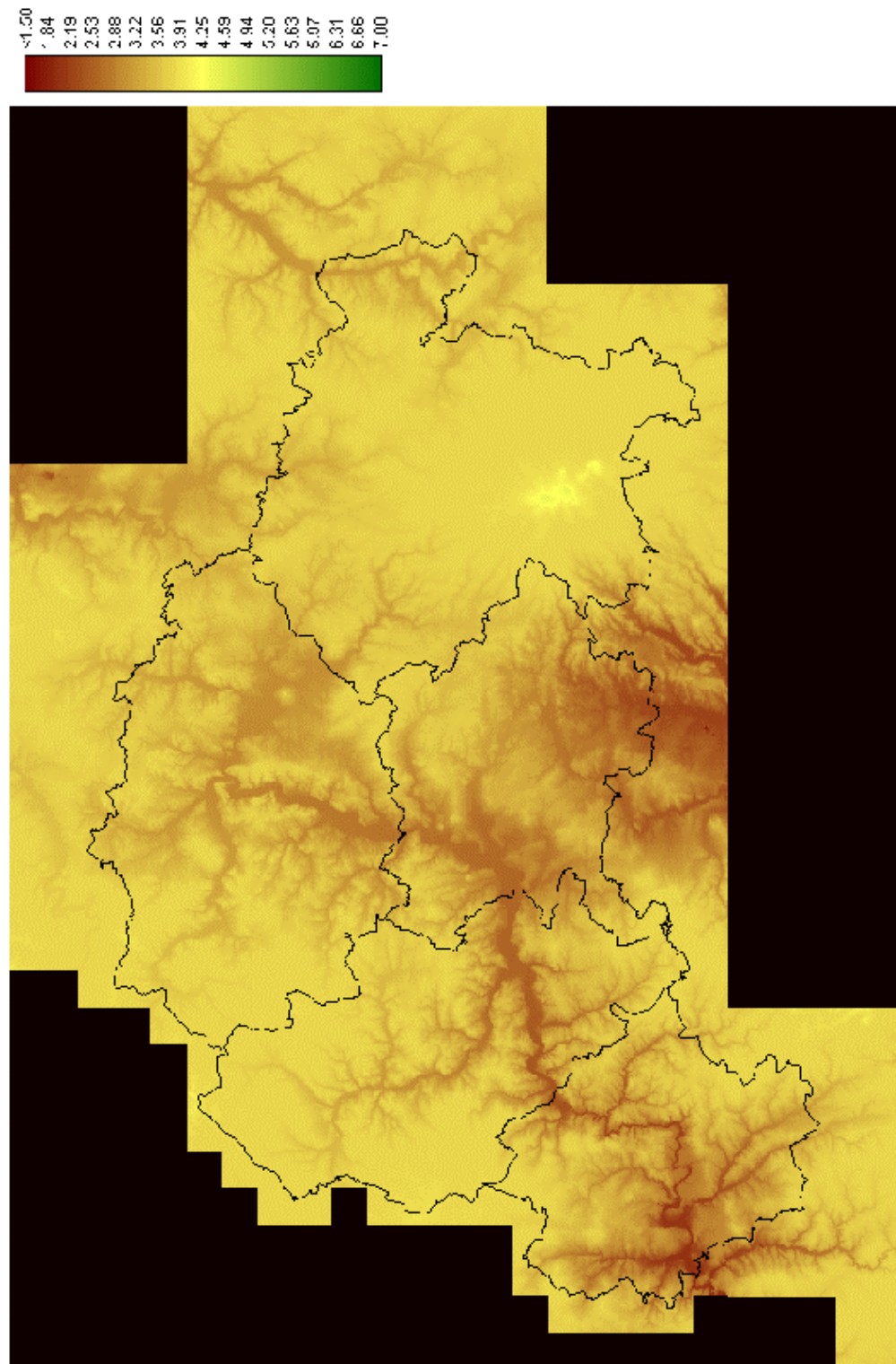


Abbildung 4.8: Windgeschwindigkeiten in Mittelhessen 10 Meter über Grund. Diese Windkarte beruht auf der Abhängigkeit zwischen Höhe über Meeresspiegel und Windgeschwindigkeit (siehe Kap. 4.1.1.1).

4.3.2 Windgeschwindigkeit und Hügелеffekt

Mit der Hangneigung ändert sich die nutzbare Windgeschwindigkeit eines Standorts. In den folgenden Windkarten wird daher neben der Bedeutung der Höhe über NN auch ein Hügелеffekt berücksichtigt.

Dazu werden die relevanten Flächen nach Ausschluß von Hangneigungen über 25° mit dem Teilmodell Hügелеffekt (Kap. 4.1.1.3) verknüpft. Dieser Effekt beschleunigt im Untersuchungsgebiet den Wind maximal um 13%. Gleichwohl ist nicht auszuschließen, daß die Wirkung des speed up lokal höhere Werte erreichen kann.

Erneut findet sich eine grobe Einteilung von Mittelhessen in einen zentralen Teil, der bei der Windnutzung benachteiligt ist gegenüber den Teilen der Region, die sich westlich und östlich davon befinden (Abb. 4.9). Erkennbar ist der Hügелеffekt bei Reliefstrukturen, die eine erhöhte Hangneigung erwarten lassen. Das sind insbesondere die Abhänge von Flußtälern. An den Erhebungen ist die Hügelwirkung nicht immer deutlich zu erkennen.

Während die beiden südlichen Kreise von Mittelhessen, Limburg-Weilburg und Gießen sich weiterhin durch niedrige mittlere Windgeschwindigkeiten auszeichnen, bieten die anderen drei Landkreise gute Standorte für WEA, unter den bis hierher geltenden Modellbedingungen.

Zwei dieser begünstigten Landkreise, der Lahn-Dill-Kreis und der Kreis Marburg-Biedenkopf liegen im Westen der Region Mittelhessen. Beide besitzen einen erheblichen Anteil am Lahn-Dill-Bergland oder am Westerwald. Im Lahn-Dill-Kreis fallen enge Flußtäler auf, die in westliche Richtungen entwässern. Neben dem hangbedingten speed up, könnte in diesen Fällen auch eine Beschleunigung durch die Talverengung mit steilen Hängen erfolgen. Mitteleuropa, zu dem Mittelhessen zählt, ist durch Westwindlagen geprägt. Das Lahn-Dill-Bergland ist eine periphere Region, die vor Ort nur wenige Einkunftsquellen für die ansässige Bevölkerung bietet. Hier finden großräumige Verbrachungen statt und die Nutzung von Windenergie, könnte eine interessante Verdienstquelle für die Einheimischen werden (Braun et al. 1998).

Der östlichste Landkreis von Mittelhessen, der Vogelsberg, besteht fast ausschließlich aus Flächen, die windtechnisch nutzbar sind. Der Hügелеffekt verstärkt diese günstige Situation. In den Höhenlagen des Vogelsberges befindet sich ein flächenmäßig kleiner Teil, der deutlich über dem Grenzwert von 4 m/sec liegt. Er ist damit einzigartig in Mittelhessen.

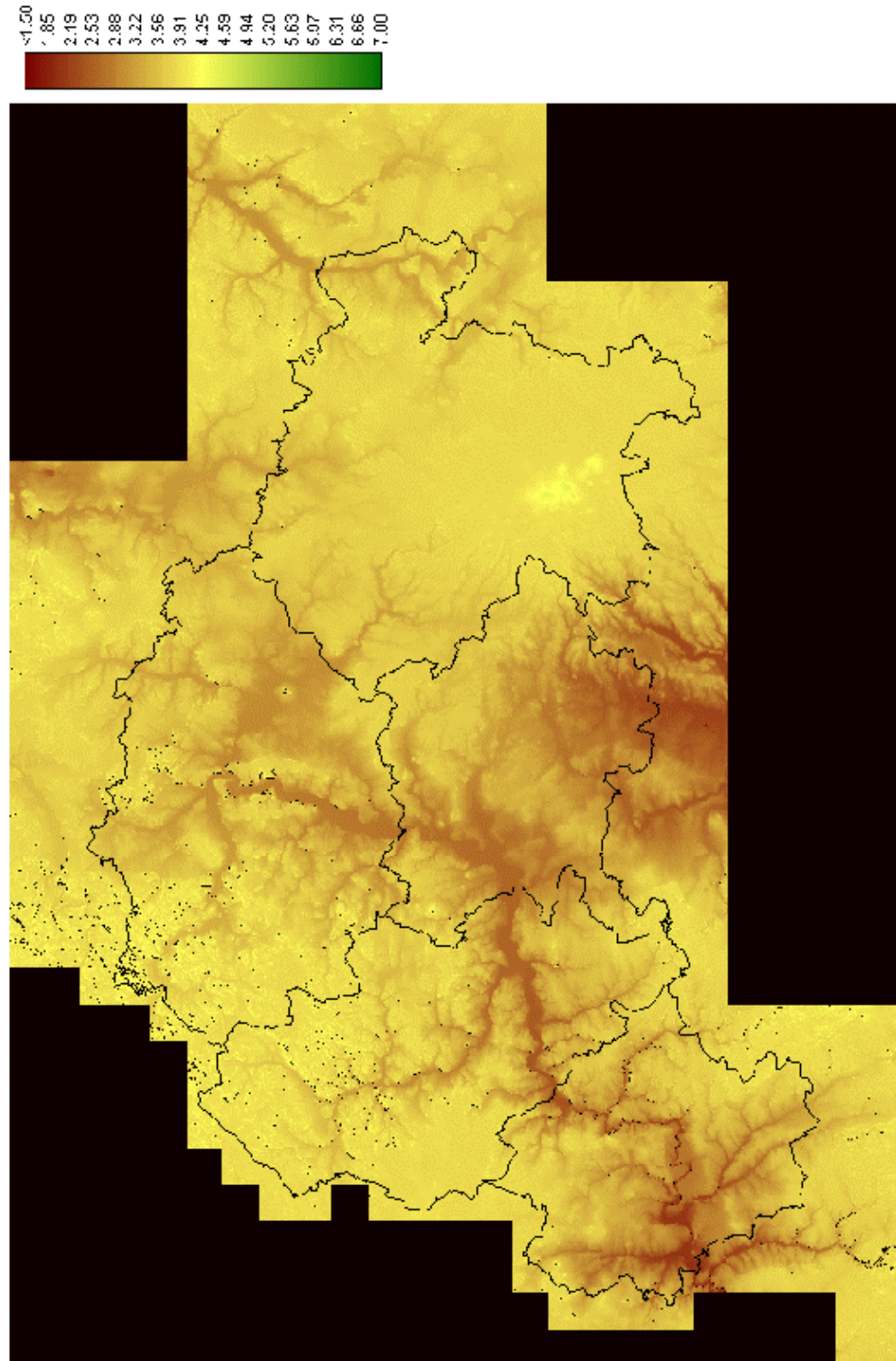


Abbildung 4.9: Windgeschwindigkeiten in Mittelhessen 10 Meter über Grund unter Berücksichtigung des Hügelleffekts. Als schwarze Punkte erkennbar sind die Flächen, die eine Hangneigung über 25 Altgrad aufweisen.

4.3.3 Windgeschwindigkeit und die Höhe über dem Grund

Über die Wirtschaftlichkeit eines Windkraftstandorts entscheidet auch die geplante Höhe der Windmühlennabe, an der die Rotorblätter befestigt sind. Zwei Höhen werden hier untersucht. In beiden Fällen wird das speed up des Hügelleffekts mit eingerechnet. Windenergieanlagen besitzen heute Nabenhöhen zwischen 50 und 100 Metern. Geplant wird aber bereits für WEA mit größeren Nabenhöhen.

4.3.3.1 Nabenhöhe 50 Meter über Grund

Betrachtet man die Windgeschwindigkeit in 50 Metern Höhe über Grund, so wirkt Mittelhessen unerwartet differenziert (Abb. 4.10). Nunmehr erweist sich Mittelhessen als weiträumig nutzbar für die Erzeugung von Windenergie. Freilich wird eine wirtschaftlich sinnvolle Planung weiterhin die Standorte in Mittelhessen suchen, die besonders hohe Windgeschwindigkeiten aufweisen. Aber auf der anderen Seite sind bei einer Höhe von 50 Metern viele Gemeinden Mittelhessens bei der Nutzung von Windenergie nicht mehr von vorne herein ausgeschlossen, weil bei ihnen der Wind nicht stark genug weht. Augenfällig ist nach wie vor das Gebiet des Lahntals und der Wetterau ungeeignet für die Windenergienutzung. Obschon sich die ungünstigen Bereiche hier deutlich verkleinert haben.

Die Landkreise Limburg-Weilburg und Giessen besitzen 50 m über Grund reichlich Standorte zur Windenergienutzung. Gleichwohl sind diese beiden Kreise nach wie vor auch diejenigen Landkreise, die flächenmäßig den größten Anteil an für die Windenergienutzung untauglichen Flächen besitzen.

Im Lahn-Dill-Kreis werden nunmehr einige Flußtäler nutzbar zur Erzeugung von Sekundärenergie aus Wind. Damit ergibt sich eine weitere Möglichkeit Windenergiegegnern entgegen zu kommen. Diese fürchten die Beschädigung der Ressource Landschaftsbild durch hohe WEA, die weithin sichtbar sind. WEA in Tallagen bleiben durch ihre tiefe Lage verdeckt.

Der Kreis Marburg-Biedenkopf wächst zunehmend in die Chance zur Nutzung von Windenergie hinein. Lediglich in seinem südlichen Bereich des Lahntals finden sich noch windungünstige Lagen.

Besonders vorteilhaft stellt sich Situation für den Vogelsbergkreis dar. Der Kreis eignet sich in 50 Metern Höhe über Grund flächendeckend zur Nutzung von Windenergie.

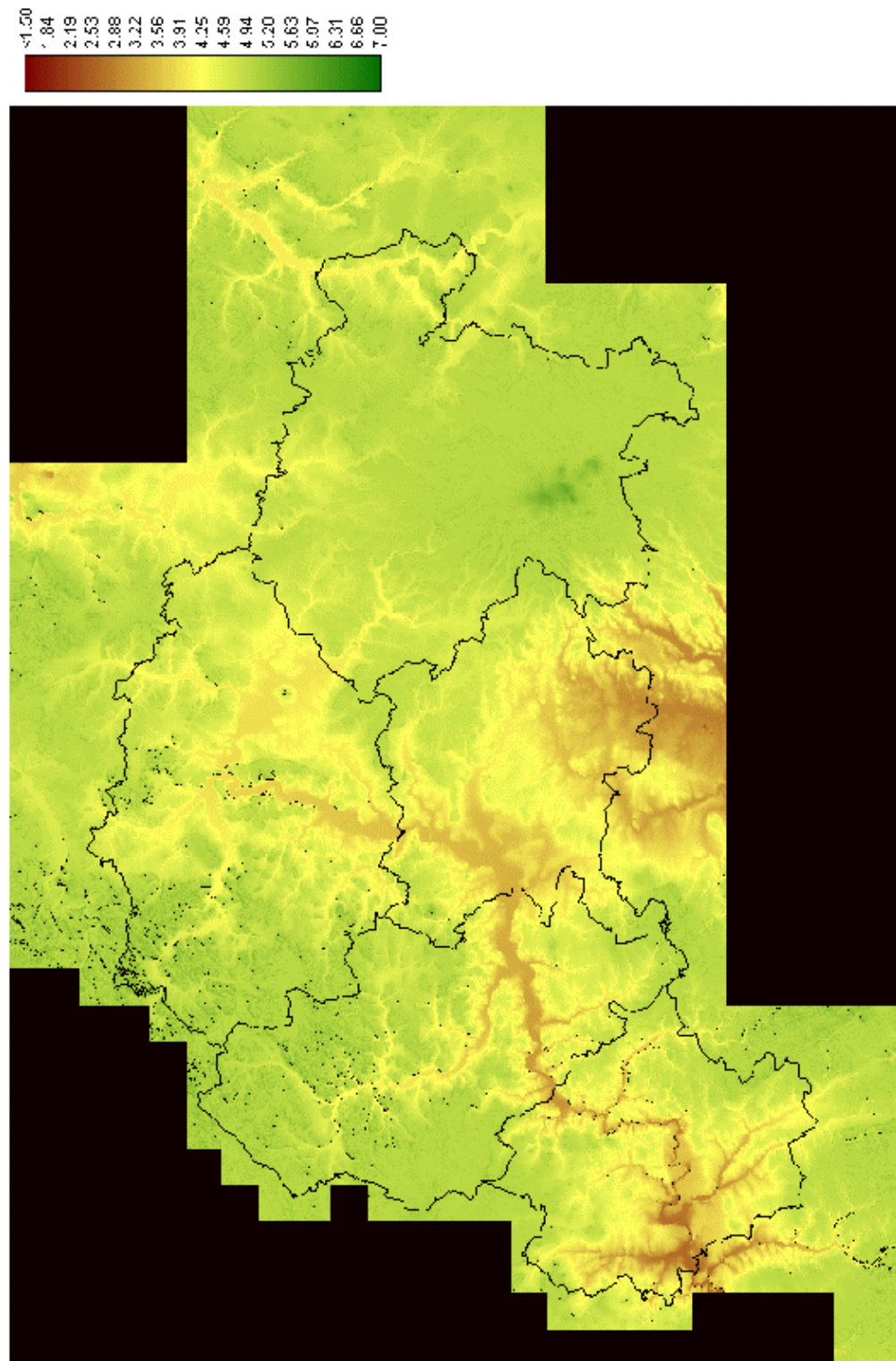


Abbildung 4.10: Windgeschwindigkeiten in Mittelhessen 50 Meter über Grund. In dieser Darstellung wird ein Hügelfekt berücksichtigt.

4.3.3.2 Nabenhöhe 100 Meter über Grund

Bei Nabenhöhen von 100 Metern über Grund erscheint Mittelhessen noch besser geeignet für die Errichtung von Windenergieanlagen als im vorigen Abschnitt beschrieben (Abb. 4.11). Einsenkungen im Relief verlieren an Bedeutung bei der wirtschaftlichen Entscheidung für den Aufbau einer WEA. Die Aufteilung Mittelhessens in eine zentrale, für die Windenergienutzung schlecht geeignete Lage und die beiden peripheren Teilregionen mit besserer Windhöffigkeit bleibt zwar grundsätzlich erhalten. Doch wird die zunehmende Eignung der gesamten Region für WEA erkennbar.

Betrachtet man die einzelnen Landkreise, so finden sich die zuvor schon gesehenen Eignungen im Grundsatz wieder. Nur wenige Bereiche, im Süden von Limburg-Weilburg und dem südlichen Teil des Landkreises Gießen sowie dem Lahntal bleiben für die Windenergienutzung uninteressant. Im Kreis Gießen ist bei 100 Metern Nabenhöhe die Nutzung selbst im Giessener Becken wirtschaftlich.

Im Landkreis Marburg-Biedenkopf wird das Lahntal flächendeckend wirtschaftlich nutzbar für WEA. Damit ist dies der zweite Landkreis, der insgesamt für die Nutzung der Windenergie geeignet ist.

Die nutzbaren Flächen nehmen in allen Landkreisen zu. Für die Aufstellung von WEA bleibt dennoch zu differenzieren, wo die besten Energieerträge zu erwarten sind. Diese finden sich im Bereich des Vogelsberges, wobei hier nunmehr eine zunehmende Differenzierung stattfindet hinsichtlich hoher Windgeschwindigkeiten. Damit einher geht die Ausweitung der Flächen besonders günstiger Windgeschwindigkeiten. Der Vogelsbergkreis hat in dieser Hinsicht einen Standortvorteil, der auf kleiner ausgedehnten Flächen am ehesten noch von Teilen der Westkreise Mittelhessens, Lahn-Dill und Marburg-Biedenkopf, erreicht wird. Interessant für den Vogelsbergkreis ist das Ohmtal, welches nach Nordwesten ausgerichtet ist. Ähnlich wie bereits für den Lahn-Dill-Kreis vermutet, könnten sich auch hier günstige Standorte für WEA finden, weil westliche Winde einem Düseneffekt unterliegen.

Unter diesen Bedingungen besitzt Mittelhessen nur mehr wenige Flächen, die eine Windenergienutzung aufgrund naturwissenschaftlicher Gründe ausschließen. Vermutlich werden daher politische Entscheidungen für oder gegen den Ausbau der Windenergienutzung zunehmen.

Die beobachtete Entwicklung der Windgeschwindigkeiten entspricht den Modellvorstellungen aus Kapitel 4.1. Ihre regionale Ausprägung ist daher nicht überraschend.

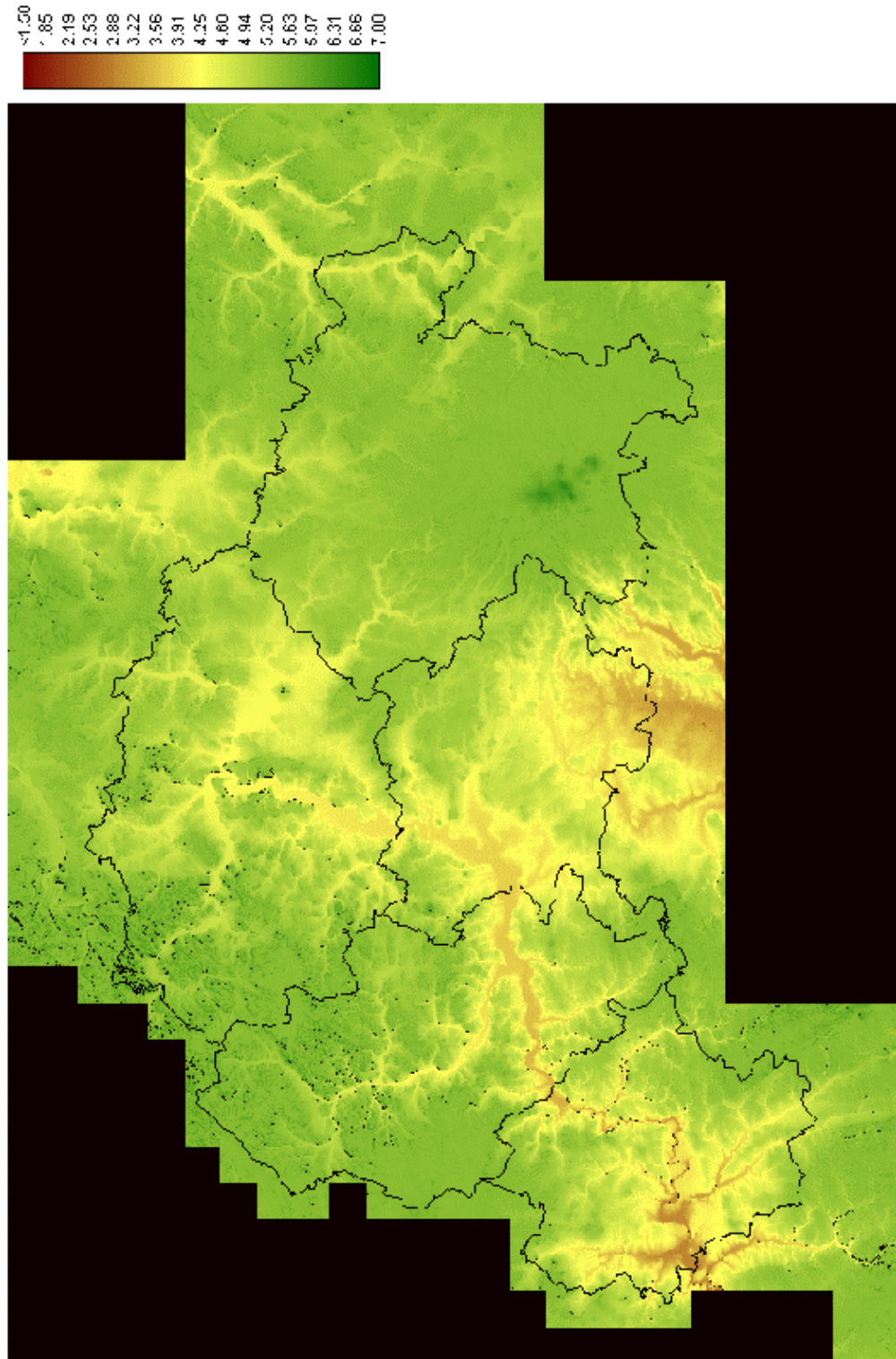


Abbildung 4.11: Windgeschwindigkeiten in Mittelhessen 100 Meter über Grund. In dieser Darstellung wird ein Hügelfekt berücksichtigt.

4.4 Windleistungskarten für Mittelhessen

Die Windleistung eines Standorts berechnet sich aus der effektiven Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe und wird in diesem Teil der Modelluntersuchung in Watt/m² angegeben. Diese Angabe ist sinnvoll, da ein wesentliches Leistungsmerkmal von Windenergieanlagen deren vom Rotor überstrichene Fläche ist. Mit diesen Angaben kann dann unmittelbar der Energieertrag für spezifische WEA abgeleitet werden.

4.4.1 Windleistung aufgrund einer mittleren Windgeschwindigkeit

Vereinfachend wird zunächst angenommen, daß die Windleistung von der mittleren Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe abhängt. Tatsächlich unterliegt die Windgeschwindigkeit jahreszeitlichen und örtlichen Schwankungen. Letztere ergeben sich aus dem Relief oder dessen Beschichtung im näheren Umkreis der WEA. Das können Erdaushübe von Baustellen sein, Einzelgehöfte oder Waldgebiete.

Nimmt man einen Grenzwert von 4 m/sec für die Windgeschwindigkeit an, ab der eine wirtschaftliche Nutzung sinnvoll ist, so errechnet sich daraus ein Grenzwert für die Leistung des Windes von knapp 40 Watt/m² nach Gleichung 4.1.

4.4.1.1 Nabenhöhe 50 Meter über Grund

Eine wirtschaftliche Nutzung der Windenergie ist in dieser Höhe für den Großteil von Mittelhessen möglich (Abb. 4.12). Der Anteil nutzbarer Flächen in der Region beträgt ca. 80%. Die berechnete maximale Leistung beträgt 147 Watt/m² für Mittelhessen.

Besonders ertragreiche Standorte für WEA finden sich in den Landkreisen Lahn-Dill, Marburg-Biedenkopf und Vogelsberg. Während in den Landkreisen Gießen sowie Limburg-Weilburg die Gunstflächen vergleichsweise klein sind und von Flächen mit wenig Windleistung unterbrochen werden, bietet der Vogelsbergkreis größere und zusammenhängende Gunstflächen. Im Vogelsberg sollten daher Windfarmen zu erwarten sein. Einzelaufstellung scheint sich für die Landkreise Lahn-Dill und Marburg-Biedenkopf eher zu eignen. Abbildung 4.12 zeigt, daß der Vogelsbergkreis im äußersten Südwesten ungeeignet für die ökonomische Windenergienutzung ist.

Die Kreise Limburg-Weilburg und Giessen sind gegenüber ihren Nachbarkreisen benachteiligt hinsichtlich der Windleistung. Die wirtschaftliche Nutzung von Windenergie ist aber auch hier noch vielerorts möglich.

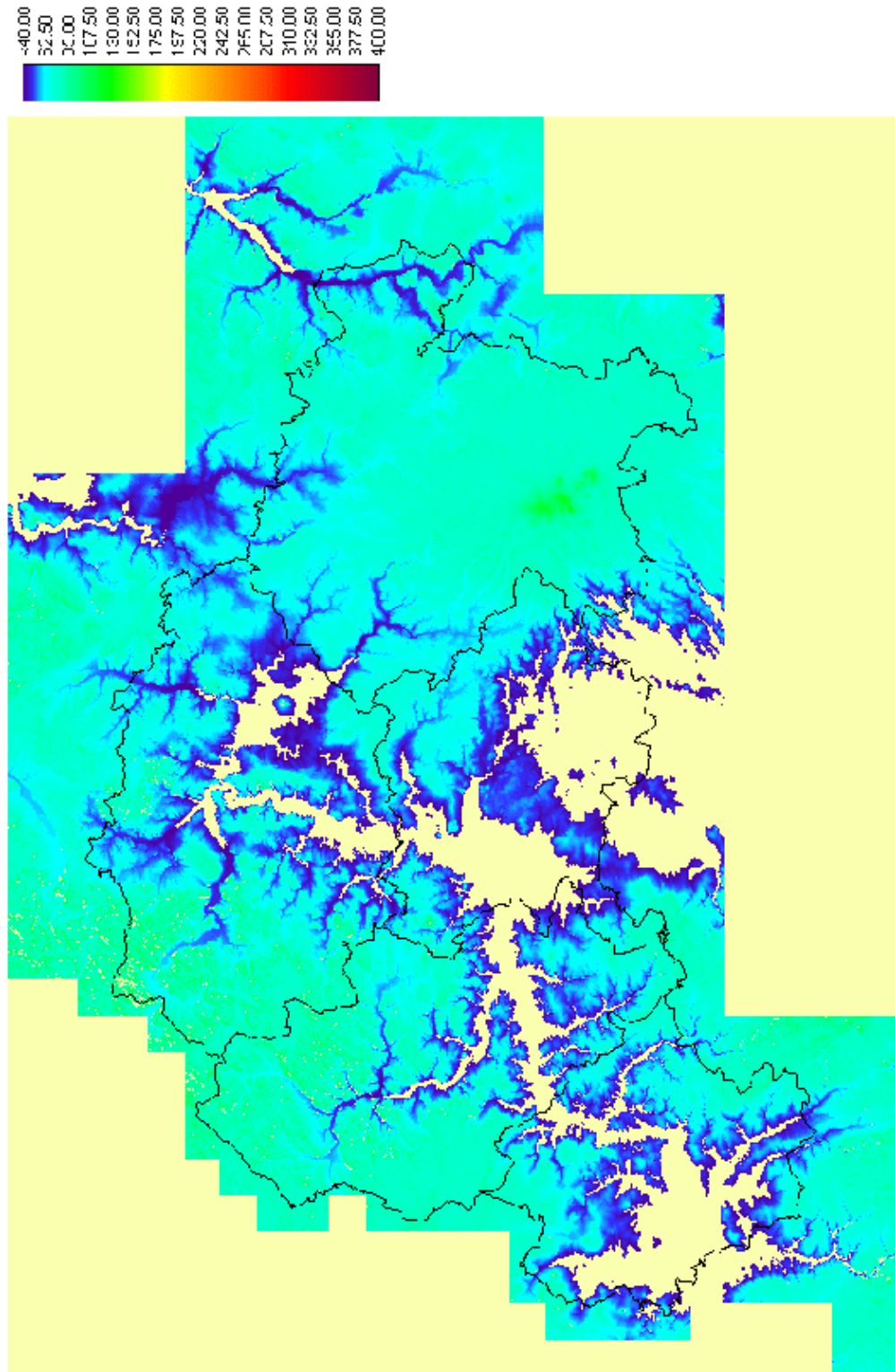


Abbildung 4.12: Windleistung in Mittelhessen 50 Meter über Grund. In dieser Darstellung wird ein Hügelfekt berücksichtigt. Der Leistungsberechnung liegt eine mittlere Windgeschwindigkeit zugrunde.

4.4.1.2 Nabenhöhe 100 Meter über Grund

Windenergieanlagen mit 100 Metern Nabenhöhe lassen sich in allen Kreisen Mittelhessens wirtschaftlich betreiben (Abb. 4.13). Wie in den Kapiteln zuvor angemerkt bergen die westlichen und die östlichen Landesteile mehr Windenergiepotential als die zentralen Teile der Region. In den Hochlagen des Vogelsbergs sind Windleistungen zu erkennen, die an jene der westlichen Rhön heranreichen. Bis auf einen kleinen Ausläufer der Wetterau läßt sich bei 100 m Nabenhöhe Windenergie im ganzen Vogelsbergkreis ökonomisch nutzen.

Die Unterschiede in der Aussage zur Eignung des Vogelsberkreises für die Windenergienutzung ergeben sich aus der höheren Auflösung der feineren Skala Windleistung gegenüber der Skala Windgeschwindigkeit (siehe Kap. 4.3.3.1). Anzumerken bleibt in diesem Zusammenhang, daß bei diesen Berechnungen lediglich eine mittlere Windgeschwindigkeit berücksichtigt wird. Anhand der weibullverteilten Windgeschwindigkeit ergeben sich höhere Windleistungen.

Die bisherige Ausweisungspraxis von Flächen für die Windenergienutzung in Mittelhessen dokumentiert die Gunstlage des Vogelsberkreises (Tab. 4.1).

Tabelle 4.1: Anzahl der ausgewiesenen Flächen für die Windenergienutzung im Regionalplan Mittelhessen (2001), sowie Realisierungsgrad.

<i>Landkreis</i>	<i>geplant</i>		<i>verwirklicht</i>		<i>gesamt</i>	<i>Realisierungsgrad</i>
Giessen	9	8%	0	0%	9	0%
Lahn-Dill	14	13%	6	21%	20	30%
Limburg-Weilburg	22	21%	1	4%	23	4%
Marburg-Biedenkopf	27	25%	3	11%	30	10%
Vogelsberg	36	33%	18	64%	54	33%
Summe	108	100%	28	100%	136	21%

Danach waren 2001 in der gesamten Region von den ausgewiesenen Windnutzungsflächen lediglich 21% realisiert. Spitzenreiter bei der Umsetzung der Windenergienutzung waren der Vogelsberg und der Lahn-Dill-Kreis. Auffällig ist dabei die Zurückhaltung des Kreises Marburg-Biedenkopf.

Insgesamt entspricht die Zahl der Windnutzungsflächen tendenziell der Eignung der Landkreise zur Nutzung der Windenergie. Der Leistungsspitzenwert beträgt in diesem Szenario 196 Watt/m².

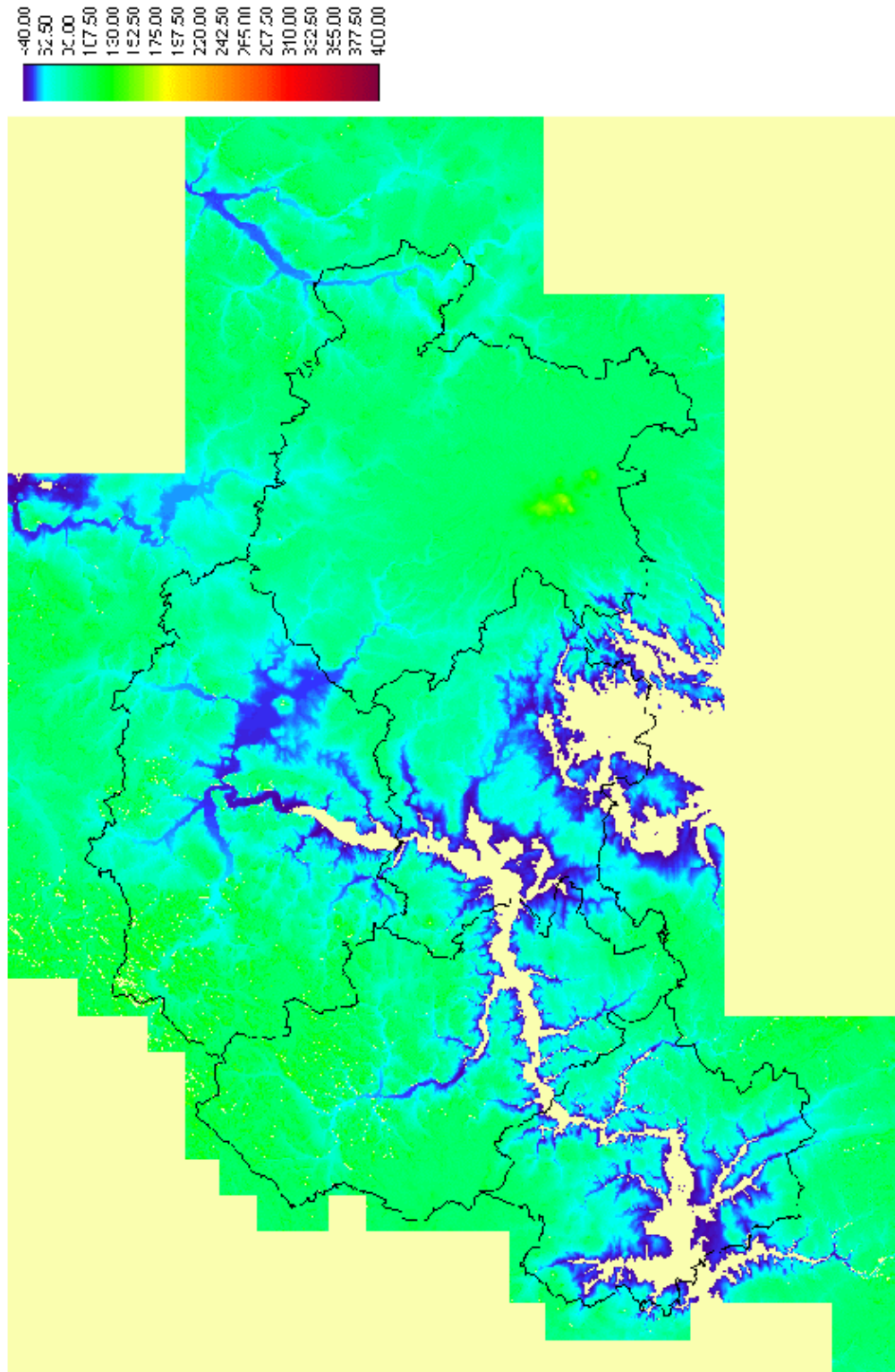


Abbildung 4.13: Windleistung in Mittelhessen 100 Meter über Grund. In dieser Darstellung wird ein Hügelfeffekt berücksichtigt. Der Leistungsberechnung liegt eine mittlere Windgeschwindigkeit zugrunde.

4.4.2 Windleistung in Abhängigkeit von der Windvarianz

In der Praxis zeigt sich, daß die Windmühlenleistung an einem Standort etwa doppelt so groß ist, wie aus der bloßen Berücksichtigung mittlerer Windgeschwindigkeiten zu erwarten wäre.

Die Berechnung der Windleistung aus der mittleren Windgeschwindigkeit eines Jahres unterschätzt die tatsächlich vorgefundene Windleistung in Mitteleuropa regelmäßig. Das liegt daran, daß Windgeschwindigkeiten in Wirklichkeit nicht gleich verteilt sind. Es gibt Phasen niedriger Windgeschwindigkeit und solche mit hohen Windgeschwindigkeiten. Da die Leistung des Windes aber mit der dritten Potenz seiner Geschwindigkeit zunimmt, leisten hohe Windgeschwindigkeiten einen unverhältnismäßig größeren Beitrag zur Energieausbeute als niedrige Windgeschwindigkeiten. Deren Gleichgewichtung, wie sie in der Berechnung des arithmetischen Mittels vorausgesetzt wird, ist damit falsch. Daher rührt auch die Unterschätzung der Windleistung aufgrund einer mittleren Windgeschwindigkeit. Für die Beschreibung dieser Windvarianz hat sich die Weibullverteilung als geeignet erwiesen. Diese kann standortspezifisch angepaßt werden. Aus dieser Erfahrung heraus macht es Sinn Standorte zu erschließen, die zwar geringe mittlere Windgeschwindigkeiten aufweisen, aber in ihrer Windverteilung einen hohen Anteil großer Windgeschwindigkeiten besitzen.

4.4.2.1 Nabenhöhe 50 Meter über Grund

Nimmt man eine weibullverteilte Windvarianz für Mittelhessen an, so entstehen bereits in 50 Metern Nabenhöhe deutlich verbesserte Windenergiepotentiale für Mittelhessen (Abb. 4.14). Diese liegen klar über den Werten des Kapitels 4.4.1. Besonders günstig ist erneut der Vogelsbergkreis zur Nutzung von Windenergie. Doch auch die Landkreise Lahn-Dill und Marburg-Biedenkopf besitzen reichlich windhöffige Standorte. Keinem Landkreis ist die wirtschaftliche Nutzung der Windenergie in Mittelhessen unmöglich. Die maximale Windleistung beträgt 277 Watt/m².

Neben dem Vogelsbergkreis ist nunmehr auch im Kreis Marburg-Biedenkopf die Stromerzeugung aus Windenergie flächendeckend wirtschaftlich. In den drei anderen Kreisen nehmen die Gunstflächen zu oder deren Windenergiepotential steigt.

Es wird in Mittelhessen zunehmend schwierig Flächen zu finden, die ungeeignet zur Windenergienutzung sind.

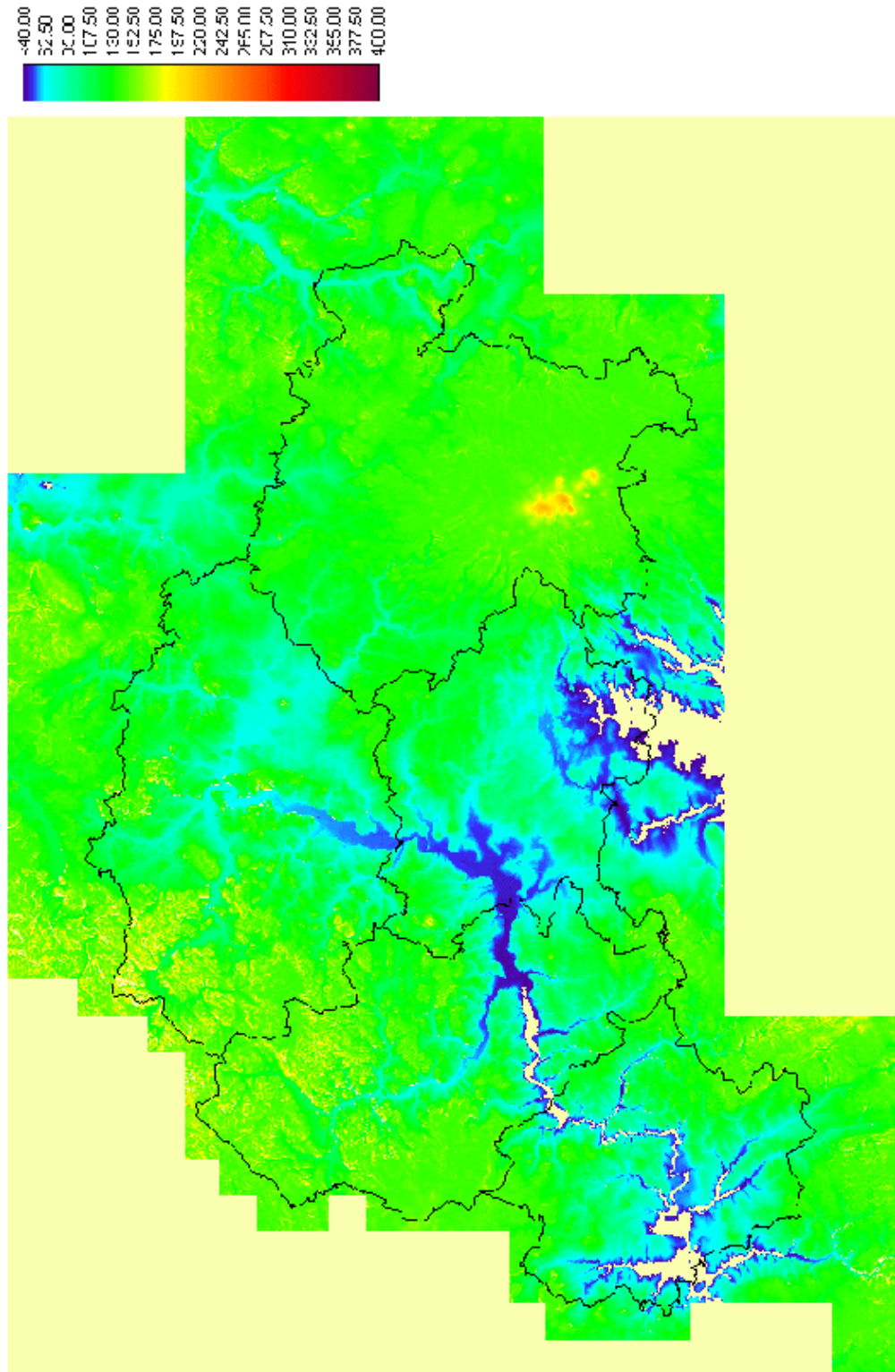


Abbildung 4.14: Windleistung in Mittelhessen 50 Meter über Grund. In dieser Darstellung wird ein Hügelfekt berücksichtigt. Der Leistungsberechnung liegt eine webullverteilte Windgeschwindigkeit zugrunde.

4.4.2.2 Nabenhöhe 100 Meter über Grund

Bei einer Nabenhöhe von 100 Metern über Grund gibt es in Mittelhessen fast nur noch günstige Standorte für die Nutzung der Windenergie (Abb. 4.15). Für die Regionalplanung ist dieser Sachverhalt eine große Chance, da die Aufstellung von WEA nicht länger in den Widerstreit mit örtlichen Vorbehalten geraten muß. Ausweichflächen sollten leicht zu finden sein.

Die prozentualen Flächenanteile in Mittelhessen, welche eine wirtschaftliche Nutzung der Windenergie nicht zulassen sind bei 100 Metern Nabenhöhe auf unter 5% geschrumpft.

Als dritter Landkreis erlangt der Lahn-Dill-Kreis die flächendeckende Eignung für ökonomische Windenergienutzung zur Stromproduktion.

Mit 368 Watt/m² wird der höchste Windenergieleistungswert für den hohen Vogelsberg prognostiziert.

Unter diesen Bedingungen ist ein Ausbau der Windenergienutzung in Mittelhessen wirtschaftlich sinnvoll. Er würde in bislang benachteiligter Regionen erfolgen und dezentrale, mittelständische Energie- und Servicebetriebe entstehen lassen.

Bei Nabenhöhen von 100 Metern wird die Stromerzeugung unabhängiger von den topographischen Randbedingungen als bei niederen Nabenhöhen. Derartige Randbedingungen sind zum einen das kleinräumige Relief um die WEA oder die Reliefbeschichtung, wie z.B. Waldbestand in der Nähe. Auch verstetigt sich die Windgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand von der Erdoberfläche. Möglicherweise sinkt auch die Gefährdung der WEA aufgrund von Windböen.

Die bis hierher entwickelten Landkarten dienen selbst bei Nabenhöhen von 100m immer noch zur Suche günstiger Standorte. So bleibt es ökonomisch interessant, ob ein Standort eine Windleistung von 100 Watt/m² oder 200 Watt/m² erbringt. Mit den vorliegenden Karten lassen sich Auflösungen bis 40m x 40m erreichen. Wenn auch diese Auflösung die Standortsuche nicht ersetzen kann, so hilft sie doch bei der Eingrenzung von geeigneten Flächen in Mittelhessen. Zur Erinnerung: Mittelhessen ist 5381 km² groß.

Weitere Möglichkeiten diese Landkarten zu nutzen, entstehen aus deren Kombination mit anderen Geodaten, wie es beispielsweise in dieser Arbeit mit den politischen Grenzen geschieht. Der aktuelle Regionalplan von Mittelhessen, enthält Geodaten zur Führung der Stromtrassen, die für die Anbindung von WEA bedeutsam sind.

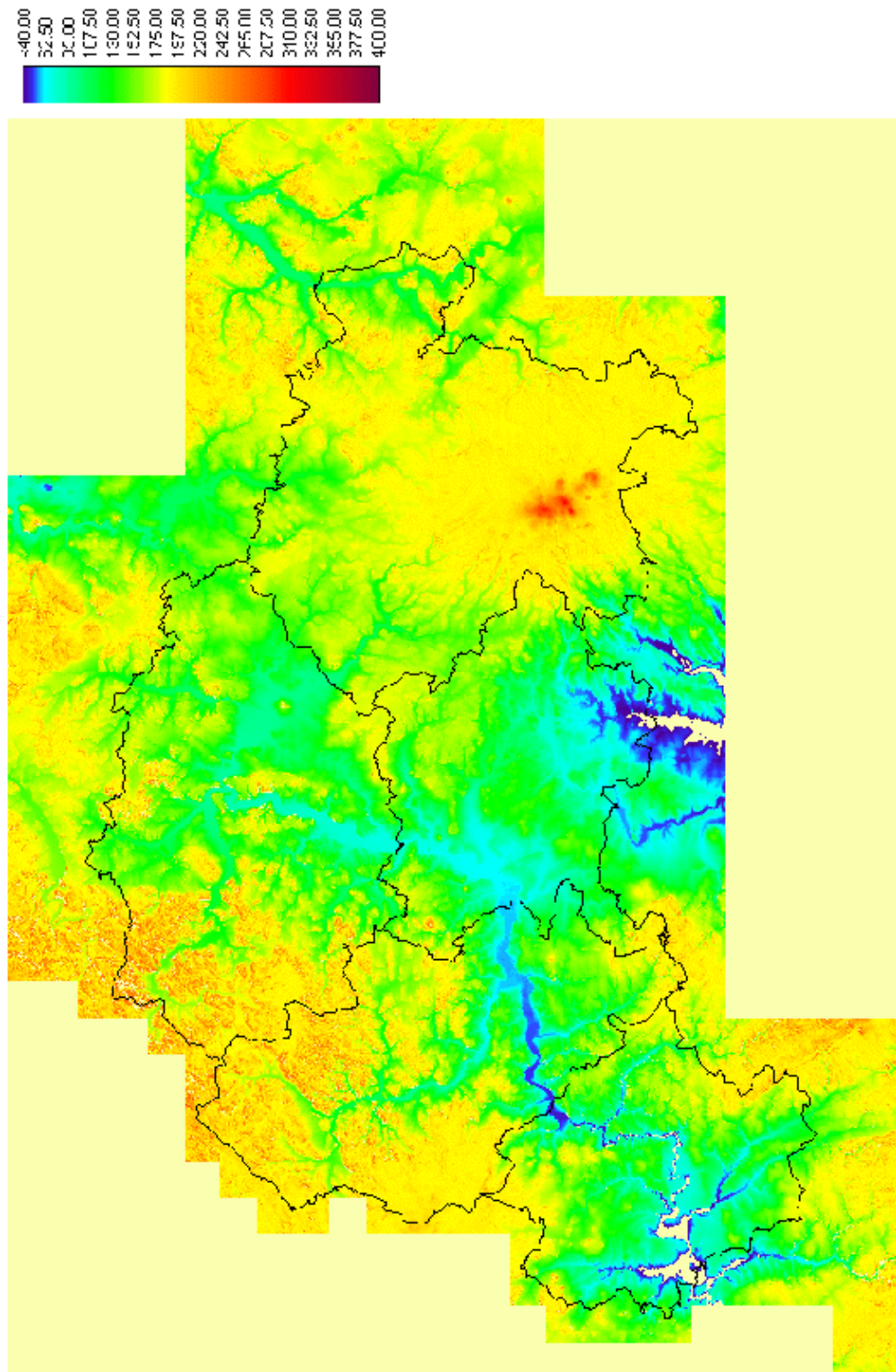


Abbildung 4.15: Windleistung in Mittelhessen 100 Meter über Grund. In dieser Darstellung wird ein Hügelfekt berücksichtigt. Der Leistungsberechnung liegt eine webullverteilte Windgeschwindigkeit zugrunde.

4.5 Workflow Windenergiepotential in Mittelhessen

Um die Transparenz der Kartenerstellung dieser Arbeit zu erhöhen, wird dokumentiert, wie einzelne Entwicklungsschritte aufeinanderfolgen und voneinander abhängen. Der Begriff Workflow beschreibt den Arbeitsvorgang, der zur Erstellung der unterschiedlichen Karten dieser Untersuchung führt. Mit der Kenntnis dieses Workflows ist es möglich einzelne Aspekte der Ermittlung des Windenergiepotentials schnell an neue Gegebenheiten anzupassen. Eine Standardisierung der Windkartenerstellung wird erleichtert.

4.5.1 Komponenten des Workflow Windenergiepotential

Die Voraussetzungen des Workflow Windenergiepotential in Mittelhessen - WWM - waren Rohstoffe (z.B. Geodaten, Wetterdaten), Werkzeuge (z.B. IDRISI, MS Excel) und Wissen (z.B. Modellideen, Literatur). Die Komponenten des WWM sind die verwendeten Landkarten (Tab. 4.2). Die einzelnen Komponenten des Workflows entstehen aus Vorstufen, wie z.B. Daten oder anderen Karten.

Tabelle 4.2: Landkarten bzw. Komponenten, die bei der Ermittlung des Windenergiepotentials in Mittelhessen erstellt und dargestellt werden (kursiv) oder von Bedeutung für den Workflow Windenergiepotential in Mittelhessen sind (aufrecht).

Nr.	Kartenbezeichnung	Dimension	Beschreibung
1	<i>height.rst</i>	<i>Meter</i>	<i>Basiskarte Mittelhessen, Höhe über NN.</i>
2	<i>windgeschw.rst</i>	<i>m/sec</i>	<i>Windgeschwindigkeit, Höhe über NN.</i>
3	hangneig.rst	Altgrad	Hangneigungen in Mittelhessen
4	<i>ausschluss.rst</i>	<i>0/1</i>	<i>Hangneigungen über 25°.</i>
5	hang relevant.rst	Altgrad	Hangneigungen $\leq 25^\circ$.
6	wind_relevant.rst	m/sec	Windgeschw. relevanter Flächen.
7	koeffizienten.rst		Beschleunigungswirkung der Hangneigung.
8	<i>wind hill.rst</i>	<i>m/sec</i>	<i>Windgeschw. in 10 m Höhe + speed up.</i>
9	<i>wind 50.rst</i>	<i>m/sec</i>	<i>Windgeschw. in 50 m Höhe + speed up.</i>
10	<i>wind 100.rst</i>	<i>m/sec</i>	<i>Windgeschw. in 100 m Höhe + speed up.</i>
11	<i>leistung 50.rst</i>	<i>W/m²</i>	<i>Windleistung aus mittl. Windgeschw., 50 m.</i>
12	<i>leistung 100.rst</i>	<i>W/m²</i>	<i>Windleistung aus mittl. Windgeschw., 100 m.</i>
13	<i>weibull 50.rst</i>	<i>W/m²</i>	<i>Windleistung aus weibullvert. Windgeschw., 50 m.</i>
14	<i>weibull 100.rst</i>	<i>W/m²</i>	<i>Windleistung aus weibullvert. Windgeschw., 100 m.</i>

4.5.2 Prozeßdarstellung

Einen schnellen Überblick des Workflows verschafft der Plan dieses Arbeitsvorgangs in der Abbildung 4.16.

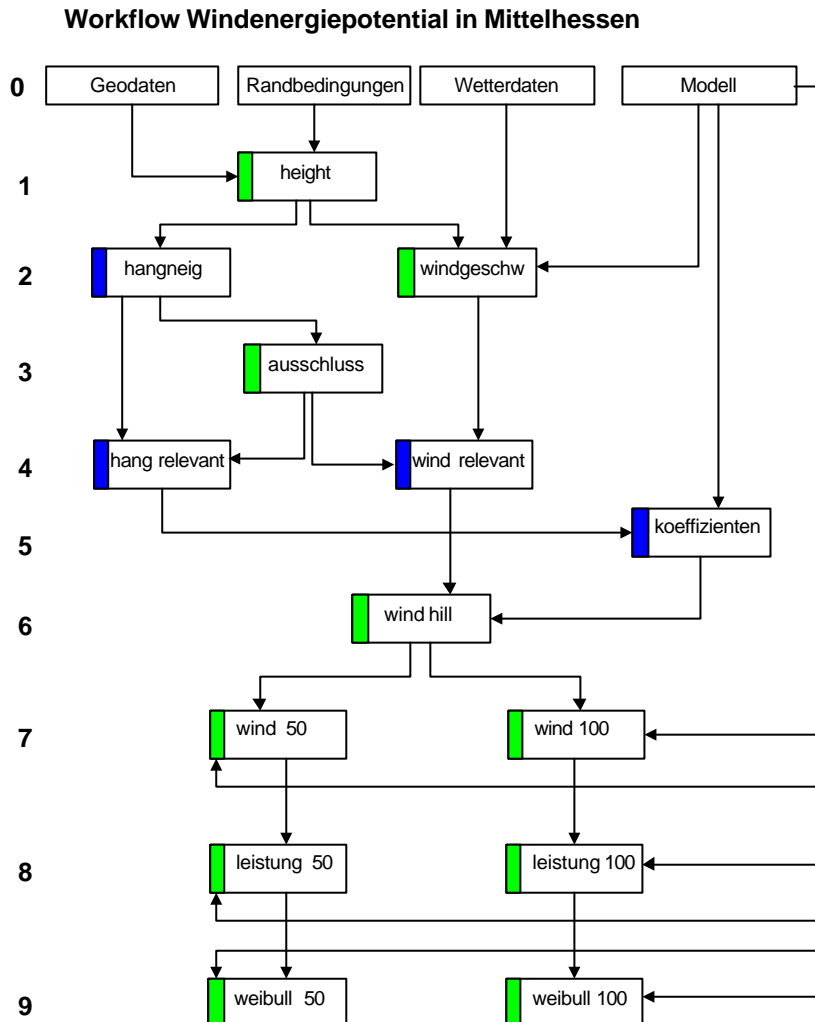


Abbildung 4.16: Workflow zu der Ermittlung des Windenergiepotentials von Mittelhessen.

Ausgehend von einem Basislevel 0 entstehen schrittweise Landkarten, die am Ende zu der relevanten Windleistungskarte bei 100 Metern über Grund führen. Mit Hilfe der Geodaten (DGM 25) und den Randbedingungen (politische Grenzen, Farbpalette, Klassenbreite) entsteht die Basiskarte als Höhenmodell von Mittelhessen. Diese dient in der Ebene 2 als Grundlage für die Landkarten zur Hangneigung und Windgeschwindigkeit. Zusätzlich sind für die Karte der Windgeschwindigkeiten Wetterdaten notwendig und ein Modell, daß die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel definiert.

Bis zur maßgeblichen Landkarte sind die Ebenen 0 bis 9 im Workflow zu bewältigen. Die verwendeten Modellvorstellungen werden in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt.

Tabelle 4.3: Verknüpfung der Modellvorstellungen mit den Daten, Informationen und Komponenten der Untersuchung des Windenergiepotentials von Mittelhessen. Die Variable h bezeichnet die Höhe eines Rasterelements der Basiskarte über dem Meeresspiegel.

Ebene	Komponente	Modellvorschrift
2	windgeschw	$0.0000000343*[h]^3 - 0.0000496278*[h]^2 + 0.0238727018*[h]$
5	koeffizienten	$0.0002*([\alpha]^2 + [\alpha]) + 1$
6	wind hill	$[Wind\ relevant]*[koeffizienten]$
7	wind 50	$[Wind_H\ddot{u}gel]*1.3$
7	wind 100	$[Wind_H\ddot{u}gel]*1.43$
8	leistung 50	$[Wind\ 50]^3 * 0.5 * 1.225$
8	leistung 100	$[Wind\ 100]^3 * 0.5 * 1.225$
9	weibull 50	$[Leistung\ 50]*1.8763$
9	weibull 100	$[Leistung\ 100]*1.8763$

Bei einigen Komponenten aus Tabelle 4.4 werden Standardprozeduren von IDRISI verwendet. Diese entstehen ihrerseits aus standardisierten Workflows und erhöhen nunmehr die Leistungsfähigkeit geographischer Analysen.

Tabelle 4.4: Verknüpfung von Karten mit den Daten, Informationen und Komponenten der Untersuchung des Windenergiepotentials von Mittelhessen.

Ebene	Komponente	Modellvorschrift
0	Basis	Geodaten, Wetterdaten, Randbedingungen, Modell
1	height	$[Geodaten] \circ \text{Prozedur CONCAT}$
2	hangneig	$[height] \circ \text{Prozedur SLOPE}$
3	ausschluss	$NOT ([hangneig] > 25)$
4	hang relevant	$[hangneig]*[ausschluss]$
4	wind relevant	$[windgeschw]*[ausschluss]$

Der Austausch einzelner Komponenten in diesem Workflow ist jetzt vereinfacht.

5 Diskussion

In den folgenden Absätzen werden die Thesen aus der Einleitung diskutiert und weitergehende Ideen entwickelt.

5.1 Die Bestimmung des Windenergiepotentials in Mittelhessen ist mit allgemein zugänglichen Daten möglich.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, daß die Bestimmung des Windenergiepotentials in Mittelhessen mit allgemein zugänglichen Daten möglich ist. Kostenfreie **Geodaten** für Mittelhessen lassen sich aus den Höhenmodellen GTOPO30 oder GLOBE herleiten (FreeGIS 2004). Diese lösen allerdings nur bis zu etwa 1 x 1 km auf. Die Daten des Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Projekts waren zum Zeitpunkt der Durchführung der Diplomarbeit noch nicht frei verfügbar (Pac 1999).

Für die Bestimmung des Windenergiepotentials in Mittelhessen dient als Grundlage das "Digitale Geländemodell 25" des Hessischen Landesvermessungsamts, HLVA. Die Kosten der ersten DGM 25 Datengrundlage dieser Arbeit werden vom HLVA mit 42069 Euro beziffert. Außerdem ist diese Datenbasis mit Nutzungseinschränkungen versehen. Dessen Auflösung in 40 x 40 Meter Raster ermöglicht aber einen Kartenmaßstab, der größer ist als der des DWD Modells (Gerth & Christoffer 1994, HLUG_b 2003). Damit wird der **geographische Blickwinkel** des Windenergiepotentials gestärkt. Aufgrund der Bedeutung des Reliefs für die Nutzung der Windenergie ist diese Entscheidung folgerichtig (Gerdes et al. 1997, Glas & Keymer 2001, Gross et al. 2002).

Für die Darstellung der politischen Grenzen Mittelhessens werden Daten des HLVA verwendet, die nicht frei verfügbar sind. Allerdings lassen sich diese politischen Grenzen Mittelhessens mit überschaubarem Aufwand selbst digitalisieren, wenn nicht auf einen entsprechenden freien Datensatz zugegriffen werden kann.

Weitere Daten und Informationen werden über **allgemein zugängliche Quellen** beschafft. So war es ein Ziel diese Untersuchung weitgehend auf Daten und Informationen zu verzichten, die Restriktionen unterliegen und dadurch in ihrer freien Verwendung und Diskussion beschränkt sind. Damit gelangt dieses Projekt nahe an die Philosophie der "Open Source" Bewegung, die sich für frei zugängliche Information im EDV Bereich weltweit einsetzt (Degen et al. 2003). In diesem Zusammenhang sei auf das Entwicklungspotential hingewiesen, das in offenen Produkten stecken kann

(FSFeurope 2003). Bricht man diese Thesen auf die vorliegende Arbeit herunter, so könnte die Windleistungskarte von Mittelhessen als Ausgangspunkt oder auch als Vergleichsmarke für die Weiterentwicklung von Landkarten zum regionalen Windenergiepotential dienen.

Im Bereich der **Wetterdaten** mußte nicht auf die Datenbasis des Deutschen Wetterdienstes zugegriffen werden. Dieser gibt seine Daten gegen Bezahlung unter Auflagen an Interessierte ab. Mittlerweile existieren in Deutschland Netzwerke aus Wetterstationen von Privatpersonen, die Wetterdaten über das Internet zur Verfügung stellen (Wetterwebring 2003, Goede 2003). Leider sind diese Stationen geographisch dürftig charakterisiert. So weiß der Wetterdatennehmer nicht genau, wie die nähere Umgebung der jeweiligen Wetterstation beschaffen ist. Die Datenqualität läßt sich nicht sicher einschätzen. Die Darstellung der Daten im Internet ist aber gemeinhin professionell. Das wesentliche Problem dieser privaten Wetternetze liegt in deren zeitlich beschränkter elektronischer Datenbasis. So ist es nur selten möglich Daten aus zurückliegenden Jahren zu erhalten. Diese sind dann immer aggregiert. Möglicherweise aber entwickelt sich dieser Aspekt der Wetterdatenarchivierung und -qualifizierung in Zukunft weiter. Für diese Diplomarbeit wird aus den genannten Gründen und wegen der dünnen, internetfähigen Meßstationendichte von der Nutzung dieser Wetterdaten abgesehen. Das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie verfügt über ein eigenständiges Klimameßnetz in Mittelhessen. Die Daten aller Stationen sind auf Stundenbasis aus dem Internet abrufbar. In Mittelhessen arbeiten sechs Stationen: Limburg, Wetzlar, Linden, Giessen, Marburg, Grebenau. Vier dieser Stationen stehen im Stadtgebiet, Grebenau ist eine Waldstation und die Station Linden befindet sich auf offenem Grünland, das sich an einem Waldrand befindet. Für die Berechnung von Windenergiepotentialen sind diese Meßstationen wenig repräsentativ. Ihre Aufgabe liegt eher in der Dokumentation der Luftqualität. In der vorliegenden Arbeit wird daher auf die Datengrundlage des Windenergieatlas zugegriffen (Troen & Peterson 1989).

Das **Windenergiepotential** im Mittelgebirge Deutschlands ist schwieriger zu bestimmen als in der vergleichsweise flachen norddeutschen Tiefebene (Gerdes et al. 1997). Das rührt daher, daß Windgeschwindigkeiten durch Reliefstrukturen in vielfältiger Weise beeinflusst werden (Troen & Peterson 1989). Auch wenn diese Einflußfaktoren quantifiziert werden können, so bezieht sich deren wissenschaftliche Untersuchung auf Situationen, die klar definierbar sind (Salmon et al. 1987). Wechselwir-

kungen zwischen benachbarten Reliefmerkmalen, klimatischen Veränderungen und der Landnutzungsdynamik sind denkbar. Derartige Wechselwirkungen sind gegenwärtig nicht zu differenzieren.

Eine Möglichkeit dennoch mit einem derart komplexen Thema der Klimageographie umzugehen, bietet die Modellrechnung oder digitale **Simulation** (Troen & Peterson 1989, Gerth & Christoffer 1994). Wird diese Simulation jedoch isoliert betrieben, gerät sie leicht zu einem "Spielen" mit verschiedenen Parametern und bleibt am Ende unverständlich. Die Ergebnisse sind dann schwer nachzuvollziehen und taugen daher nicht als Basis für die Weiterentwicklung des simulierten Systems. Die Systemwissenschaft schlägt als Lösungsweg für die Analyse komplexer Zusammenhänge die Systemanalyse vor (Haendle & Jensen 1974). Deren aufeinander aufbauende Stufen leiten zu einem nachvollziehbaren Arbeiten an und fördern das Verständnis um die Vernetzung zwischen Teilsystemen oder Systemkomponenten. Zugleich wird dabei deutlich, daß Systeme - wie die Windkarten dieser Arbeit - in Zyklen weiterentwickelt werden und nicht unmittelbar in die Produktion gelangen müssen. Die vorliegende Arbeit folgt diesem systemanalytischen Forschungsansatz.

Der Berechnung des Windenergiepotentials in Mittelhessen liegen **einfache Modellvorstellungen** zugrunde. Diese werden anhand von Beobachtungsdaten parametrisiert. Das Modell WEPIM besteht aus einem System von Gleichungen, deren Parametrisierung nach dem Kriterium optimaler Kurvenanpassung an die Rohdaten erfolgt. Damit wird zwar die theoretische Erkenntnisfindung vernachlässigt, doch zielt diese Untersuchung auf die praktische und lokale Anwendbarkeit dieses Modells. Entgegen den Empfehlungen von Gross et al. (2002) wird in dieser Diplomarbeit ein simpler Modellansatz verwendet. Weil diese Modellvorstellungen mit umfangreichen Geodaten verknüpft werden, gerät das vorliegende Modell letztlich doch komplex. Allerdings erleichtert der durchschaubare Aufbau von WEPIM dessen Verifizierung und Validierung.

Inwieweit mit Hilfe hoch auflösenden Geodaten als Rohstoff und einem gängigen GIS als Werkzeug eine plausible Abschätzung des Windenergiepotentials für eine ganze **Region** möglich ist, kann mit der vorliegenden Arbeit geklärt werden. Diese Aufgabe ist zu bewältigen. Der Arbeitsaufwand hierfür beträgt, je nach Vorkenntnis zwischen 0,2 und 0,4 Mannjahre. Für die Erstellung eines erläuternden Berichtes und Publikationsarbeiten hierzu sind noch einmal 0,2 Mannjahre einzuplanen

Die **Systemgrenzen** dieser Untersuchung werden absichtlich auf die klimageogra-

phischen Aspekte der Problematik beschränkt, um das Modell überschaubar zu halten. Eine Kopplung mit ergänzenden Modellen bleibt dennoch möglich. Durch seine Überschaubarkeit und klare Beschreibung kann WEPIM als Komponente für andere Programmpakete oder Informationssysteme dienen.

Für das Teilmodell **Windgeschwindigkeit und Höhe über NN** wird ein Korrekturwert eingefügt, um eine Geschwindigkeitsabnahme bei steigender Höhe über NN aufzufangen (Kap. 4.1.1.1). Dieser Eingriff in den Rohdatensatz ist nötig, weil im Bereich zwischen 300 und 600 Meter Höhe über NN keine Meßwerte verfügbar sind. Der verwendete Regressionsalgorithmus von Excel 97 hätte eine physikalisch nicht plausible Situation erzeugt: die Abnahme der Windgeschwindigkeit in diesem Höhenbereich. Es bleibt die fehlende Zunahme der Windgeschwindigkeit im Bereich von 300 bis 600 Meter über NN zu erklären (Kaltschmitt & Fishediek 1995). Betrachtet man die Höhenverteilungen um Mittelhessen, so findet man etliche Höhenzüge zwischen 600 und 900 Metern über NN. Im Westen und Nordwesten sind das Westerwald und Rothaargebirge. Im Norden sind das Solling und Habichtswald. Im Osten befinden sich Kaufunger Wald und Rhön. Nach Süden hin grenzen Taunus, das Rheintal und Odenwald (Diercke & Dehmel 1970). Die Höhen von 300 bis 600 Meter erfahren offenbar ein großräumige Windbeschattung in Mittelhessen.

Bei der Modellierung der **Windgeschwindigkeit und Höhe über Grund** wurden Daten von zwei Wetterstation, Frankfurt und Hof, benutzt (Kap. 4.1.1.2). Diese Entscheidung fiel, um die variable Landschaft in Mittelhessen zu berücksichtigen.

Generell ist festzustellen, daß die Wetterdatengrundlage für diese Arbeit zwar ausreicht, eine reichhaltigere Datenbasis aber wünschenswert ist. Beispielsweise wird der **Hügeleffekt** gemeinhin als reales Phänomen erachtet (VDWI 2003). Versucht man jedoch funktionale Zusammenhänge zu erfahren, gelangt man sehr bald in einen wissensfreien Raum. Mit der vorliegenden Untersuchung wird ein Schritt in diesen Raum hinein gewagt. Die produktive Diskussion um die Validität des speed-up von WEPIM kann praktikable Verbesserungen zur Bestimmung regionaler Windenergiepotentiale in Mittelgebirgslagen Mitteleuropas bewirken. Einen ersten, offenen Ansatz legt diese Diplomarbeit dar.

Vermutlich wirken auch noch **Hangneigungen über 25°** beschleunigend auf die Windgeschwindigkeit. Dem Autor ist allerdings keine Publikation bekannt, in der ein funktionaler Zusammenhang zwischen speed up und Hangneigung über 25° entwickelt wäre. Zwar weisen Gross et al. (2002) auf die Leistungsfähigkeit ihres Modells in

dieser Hinsicht hin, ohne diese letztlich zu quantifizieren. So war die Entscheidung für den Grenzwert von 25° ein Kompromiß aus Erfahrung und der Menge aus der Untersuchung fallender Pixel aufgrund dieses Werts.

Ein weiteres Problem entstand aus der Hanglänge. Gegenwärtig nimmt das Modell WEPIM für jedes einzelne Pixel eine bestimmte Steigung an, aus der sich ein speed up errechnet. Tatsächlich sind Hänge länger und höher als die 40 x 40 Meter Pixel der hier verwendeten Geodaten. Lange Hänge weisen trotz gleicher Neigung wie einzelne Pixel ein höheres speed up auf (Salmon et al. 1987). Um diesen Sachverhalt adäquat abzubilden, wäre es nötig weiträumig Nachbarschaften unterschiedlich gewichtet zu berücksichtigen. Um WEPIM überschaubar zu halten, wird dieser Aspekt nicht weiter entwickelt.

Leewirkungen, daß heißt Verminderungen des Windenergiepotentials aufgrund von Windschattenwirkungen werden im Askervein Projekt quantifiziert (Salmon et al. 1987). Danach führen die Summen positiver Hügeleffekte und negativer Leeturbulenzen zu einer Erhöhung der gesamten Windgeschwindigkeiten von wenigstens 10% im Jahr. Bei flachen Hängen entstehen offenbar keine nennenswerten Einbußen der Windleistung im Lee. Das Teilmodell zur Hangrichtung wird deshalb nicht weiterentwickelt.

Die flächendeckende Analyse der Hangrichtungen könnte aber **windhöfliche Reliefstrukturen** sichtbar machen. Ist beispielsweise eine dominierende Windrichtung bekannt, so müßte eine Düsenstruktur Hangexpositionen zeigen, die eine 90° Abweichung zu dieser Hauptwindrichtung besitzen. Zusätzlich müßten solche benachbarte Strukturen um 180° versetzt sein. Kuppenlagen und Leelagen ließen sich auf die selbe Weise entdecken. Das vorliegende DGM 25 macht derart fein strukturierte Analysen mit Hilfe eines GIS möglich. Gängige Modelle zur Ermittlung eines Windenergiepotentials ohne GIS-Einbindung scheitern an einer solchen Aufgabe.

Die **Landnutzung** wurde in diesem Modell auf eine Standardnutzung, die dem kurzgeschnittenem Gras um normierte Wetterstationen entspricht beschränkt. Eine weitergehende Differenzierung wäre mit Hilfe der Landnutzungsdaten des Regionalplans Mittelhessen von 2001 möglich. Bei der Berücksichtigung von Landnutzungsdaten sollte die zeitliche Dynamik bedacht werden. Im allgemeinen werden WEA auf eine Lebensdauer von 20 Jahre hin geplant. In einem solchen Zeitraum kann auf einer brach gefallenem Wiese ein Baumbestand entstanden sein.

5.2 Die Produktion einer Landkarte mit dem Windenergiepotential von Mittelhessen ist mit modernen aber weitverbreiteten Werkzeugen durchführbar.

Für die Erstellung einer Windleistungskarte reicht die Nutzung moderner und weitverbreiteter **Werkzeuge** aus. Die verwendeten Hard- und Softwarewerkzeuge verlangen Aufwendungen von 100 bis 4000 Euro, je nachdem wie viele Service-Arbeitsstunden in ein solches Projekt investiert werden können.

Die verwendete **Hardware** leistete gute Arbeit. Für höher auflösende Daten von Mittelhessen ist eine leistungsfähigere aber Hardware sinnvoll.

GIS als Werkzeuge eignen sich für eine Vielzahl von Aufgabenstellungen, bei denen Geodaten bedeutsam sind (Teege 2001, Schaeben et al. 2003). Wie die Ergebnisse zeigen (Kap. 4), ist ein modernes Geographisches Informationssystem in der Lage das Windenergiepotential einer Region zu bestimmen. In dieser Diplomarbeit werden die Modellierungsschritte von den IDRISI eigenen Modellierungswerkzeugen ausgeführt. Im Gegensatz zu einem proprietären Windenergiemodell wie WASP oder SWM eignen sich GIS für die Bearbeitung großer Geodatenmengen verschiedener Standardformate. Darüber hinaus sind unmittelbar nach Bestimmung des Windenergiepotentials weiterführende geographische und geostatistische Analysen möglich. Für die Suche nach windhöffigen Geländestrukturen sind GIS gut geeignet.

5.3 Die Kartenerstellung und Modellierung läßt sich offen darstellen, so daß bei Fortentwicklung des Wissens- oder Datenbestandes die Landkarte angepaßt werden kann.

Durch die weitreichende **Dokumentation** der Modellierung und Kartenerstellung bleibt die Möglichkeit die Windleistungskarten dieser Arbeit anzupassen.

Die Leistungsfähigkeit von Hard- und Software wächst schnell. EDV Anlagen können heute mehrgliedrige Arbeitsaufträge übernehmen, die in der Vergangenheit sehr viel mühsamer von mehreren Personen ausgeführt wurden. Teilweise wird sogar ein ganzer Arbeitsprozeß oder **Workflow** übernommen und die Produktivität der einzelnen Arbeitskraft dadurch deutlich erhöht. Voraussetzung dafür ist allerdings die Kenntnis dieser Arbeitsschritte und deren Beziehung zueinander. Dazu dient ein ausgearbeiteter Workflow. Vielfach ist man sich dieser Workflows gar nicht bewußt (Hastedt-Marckwardt 1999). Beispielsweise ist das Einlesen von Daten in IDRISI ein

solcher Workflow. Automatisiert und mit standardisierten Daten ist diese Arbeit allerdings schnell erledigt. Würden die Höhendaten von Mittelhessen noch manuell in IDRISI eingegeben werden, so wäre dieser Workflow "Einlesen von Daten" mit immensem Arbeitsaufwand verbunden. Die vorliegende Diplomarbeit wäre dann nicht möglich gewesen. Der Workflow "Daten einlesen" ist heute aber nurmehr ein Befehl in IDRISI.

Ein Zusatzeffekt der Dokumentation des Workflow ist, das tiefergehendes **Verständnis** um das System Windenergiepotential in Mittelhessen sowie dessen erleichterte Analyse.

Die geschilderte Dokumentation ist eine Voraussetzung für die **Zusammenarbeit von Geographen und Informatikern**, die Softwarekomponenten entwickeln (Griffel 1998).

Der offene Aufbau des hier verwendeten Modells läßt eine einfache **Aktualisierung** und Schnittstellendefinition für ergänzende Modelle zu. Damit kann das klimageographische Windenergiepotential um technische und wirtschaftliche Aspekte erweitert werden. Auf der wirtschaftlichen Seite beispielsweise, ist ein Betreiber besonders an einer Anbindung seiner WEA an das bestehende Stromnetz interessiert. Von daher sollten geeignete Standorte in der Nähe von solchen Einrichtungen liegen. Dieverkehrliche Anbindung geeigneter Standorte ist für den Antransport der WEA wichtig. Für Landwirte bieten WEA eine zusätzliche Einnahmequelle, da sie ihre Landnutzungsflächen verpachten können. Entsprechende Geodaten sind mit WEPIM verknüpfbar.

5.4 Ausblick

Die Karten dieser Arbeit zeigen für ganz Mittelhessen ein **erhebliches Windenergiepotential**. In der praktischen Regionalplanung werden Windgeschwindigkeiten zwischen 4 und 5 m/sec angegeben, ab der Windenergienutzung wirtschaftlich ist (Schirmer 1996). Damit ist der größte Teil Mittelhessens für die Nutzung dieser Primärenergie geeignet. Für Politiker, Planer, Eigentümer und Produzenten sind allerdings differenziertere Aussagen zum Windenergiepotential in Mittelhessen notwendig. Die Windkarten aus dieser Diplomarbeit erlauben dies unter verschiedenen Blickwinkeln, bei hoher Auflösung und möglicher weitergehender Analysen.

Hinsichtlich des Windenergiepotentials in Mittelhessen, sind die bislang benachtei-

ligten **peripheren Teile der Region** im Vorteil gegenüber den tiefer liegenden zentralen Teilen von Mittelhessen. Folgerichtig ist deswegen der Ausbau der Windenergienutzung im Vogelsberg auch weiter fortgeschritten als im Zentrum der Region. Schwer zu verstehen ist allerdings, weshalb die Realisierungsquote ausgewiesener Windenergieflächen in manchen Kreisen deutlich unter der des Vogelsbergkreises liegt. Einen ähnlich hohen Realisierungsgrad wie der Vogelsbergkreis hat nur noch der Lahn-Dill-Kreis. Insbesondere der Kreis Marburg-Biedenkopf fällt in diesem Zusammenhang auf, mit lediglich einem Drittel des Verwirklichungsgrades der beiden Gunstkreise Lahn-Dill-Kreis und Vogelsbergkreis. Hier werden Geopotentiale nicht genutzt.

Inwieweit ein naturwissenschaftlich begründetes Windenergiepotential tatsächlich nutzbar ist, hängt letzten Endes von dem vorherrschenden **politischen Willen** ab. Die Regionalplanung weist in Mittelhessen Vorrangflächen für die Windenergienutzung aus. Darüber hinaus ist sie verantwortlich für Abstandsregelungen zu schützenswerten Gütern. Auf diese Weise schafft die Regionalplanung wirtschaftlich verlässliche Planungsrahmen. Diese Vorgaben sind aber politischem Kalkül unterworfen. Raumplanerisch nimmt gegenwärtig die **Restriktionsdichte** für die Windenergienutzung in Mittelhessen zu, so daß letztlich nur noch wenige der geeigneten Flächen genutzt werden können. In der Praxis des Vogelsbergkreises wird aus politischen Gründen eine Nutzung dieses Geopotentials behindert (Marx 2001).

Windenergienutzung wird gegenwärtig seitens der **etablierten Stromversorgungsunternehmen** stark angegriffen (Köpke & Friedrich 2003). Das ist verständlich, weil diese Unternehmen stark in die Nutzung erschöpfbarer Primärenergieträger investiert sind. In den vergangenen Jahrzehnten konnten sie sich konkurrenzlos und langsam dem gesetzlichen Rahmen anpassen und haben ihn ihrerseits geprägt. Ihrer Monopolstellung droht nunmehr ein beginnender Wettbewerb, der mittelständische Versorgungsbetriebe hervorbringen wird (Nitsch 2000, Landgrebe et al. 2003). In diesem Wettbewerb zählen nicht mehr nur Energieerzeugungskosten. Es werden nunmehr Kosten für Umweltbelastungen oder Produktionsrisiken einbezogen. Bislang wurden diese Kosten subventioniert, indem sie vom Staat übernommen wurden. Entfallen diese verdeckten Subventionen sind die Strompreise der etablierten Versorgungsunternehmen nicht länger günstig. Und hieraus erwächst für die etablierten Stromversorgungsunternehmen ein existentielles Problem.

Führt man sich vor Augen, daß die augenblicklich noch dominierende Ausbeutung

endlicher Vorräte an Primärenergieträgern per definitionem zu Ende gehen wird, ist nicht zu verstehen, weshalb an dieser Art Energieversorgung festgehalten wird. Nationen, die es verstehen ihre Wirtschaft frühzeitig auf regenerative Energien umzustellen, werden prosperieren während andere sich um die immer knapper werden Energievorräte streiten. **Regenerative Energien** haben die Menschheit in ihrer Geschichte bis vor kurzem gut versorgt, sie werden es in einer hochentwickelten Gesellschaft auch in Zukunft wieder tun.

6 Zusammenfassung

Windenergie steht als **regenerative Energie** weltweit zur freien Verfügung. Dieses Potential wird in Deutschland dynamisch erschlossen. Für die Ausweisung geeigneter Standorte zur Nutzung von Windenergie sind Windkarten notwendig. Diese erleichtern die Suche nach windhöffigen Flächen.

Die Region Mittelhessen verfügt über ein beachtliches **Windenergiepotential**. In der vorliegenden Untersuchung wird dies belegt. Dazu werden Windkarten der Höhen 10m, 50m und 100m über Grund herangezogen, die mit dem Modell WEPIM erstellt wurden. Bereits ab einer Nabenhöhe von 50 Metern liegt der größte Teil Mittelhessens in Bereichen mit mehr als 4 m/sec mittlerer Jahresgeschwindigkeit. Besonders windgünstig sind die Landkreise Vogelsberg, Marburg-Biedenkopf und Lahn-Dill. Aus den Windkarten werden Leistungskarten für die Höhen 50 und 100 Meter über Grund entwickelt. Die Leistungsangabe erfolgt in Watt/m². Sie wird für mittlere Windgeschwindigkeiten und weibullverteilte Windgeschwindigkeiten berechnet. Aufgrund der Windleistung weibullverteilter Windgeschwindigkeiten in 50 m Höhe über Grund erweisen sich die Landkreise Vogelsberg und Marburg-Biedenkopf als flächendeckend ökonomisch nutzbar für die Energieerzeugung aus Wind.

Zur Ermittlung des Windenergiepotentials in Mittelhessen wird das **Modell WEPIM** erstellt und für das Geographische Informationssystem IDRISI angepaßt. Neben der Höhe über NN und der Höhe über Grund, verwendet es den Hügelleffekt als wesentliche Treibervariable zur Prognose der Windgeschwindigkeit. Das Modell und seine Entwicklung werden offen dokumentiert, um seine Wiederverwendung zu gewährleisten.

Bei der eingesetzten **Datenbasis** wird weitgehend auf öffentlich zugängliche Daten gebaut. Obschon mit dem freien Datensatz GLOBE freie Geodaten für die Prognose des Windenergiepotentials verfügbar sind, wurde das DGM 25 des HLVA benutzt. Dies geschah, um die regionale Bedeutung der Orographie für die Windgeschwindigkeit besonders zu gewichten.

Tatsächlich unterliegen die Chancen der Windenergienutzung in Mittelhessen bedeutender politischer Opposition. Das naturwissenschaftlich und ökonomisch sichtbare Geopotential Mittelhessens wird im Bereich Windenergie nicht rational genutzt. Gleichwohl wird auch die **Politik** erkennen, daß erschöpfbare Energien per Definition zur Neige gehen.

7 Literaturverzeichnis

- Albers, Axel 1997:** Windjahre im Vergleich. - DEWI Magazin 11, 4-11.
- Alt, F. 2002:** Krieg um Öl oder Frieden durch die Sonne. - Riemann Verlag, München.
- Braun, P. 1994, pers. Mitt.:** Eigene Beobachtungen beim Fliegen eines Hängegleiters im Fluggebiet Eisenberg bei Battenberg/Eder belegten, daß Leeturbulenzen erst bei Hangneigungen über ca. 25 Altgrad auftreten. - Gießen.
- Braun, P. 2002:** Grundlagen der Umweltinformatik. - Vorlesungsskript, Justus-Liebig-Universität, Gießen.
- Braun, P., Becker, H. und Köhler, W. 1998:** Informationsmanagement im SFB 299: „Landnutzungskonzepte für periphere Regionen“. – Berichte der Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft, Band 11, 6-9.
- Bratley, P., Fox, B.L. & Schrage, L.E. 1987:** A guide to simulation. - Springer Verlag, New York, USA.
- Bürger, M. 2002:** Windrelevante Reliefklassifizierung. - Bochumer Geographische Schriften 68. Geographische Institut der Ruhr Universität Bochum, Bochum.
- BWE (Bundesverband Windenergie) 2003:** Datenblatt - Windenergie. - <http://www.eeg-aktuell.de/index.php/article/view/53>.
- Christoffer, J. & Ullbricht-Eissing, M. 1989:** Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland. - Berichte des Deutschen Wetterdienstes 147, Offenbach.
- Degen, M., Lanz, M. & Luthiger, J. 2003:** Open Source - Lizenzmodelle entmystifiziert. - Informatik-Spektrum 26, 305-309.
- Diercke, C. & Dehmel, R. 1970:** Diercke Weltatlas. - Georg Westermann Verlag, Braunschweig.
- Eastman, J.R. 1995:** Idrisi for Windows. User's Guide Version 1.0. - Clark University, Worcester, USA.
- Ecowatt 2003:** ecowatt - Wissen. - <http://www.ecowatt.at/>.
- Ender, C. 2003:** Windenergienutzung in Deutschland - Stand:30.06.2003. - DEWI Magazin 23, 6-18.
- FreeGIS 2004:** Free Geo-Data. - <http://freegis.org/geo-data.en.html>, 18.03.2004.
- Felix-Henningsen, P. 2000, pers. Mitteilung:** - Gießen.
- FSFeurope 2003:** Free Software Foundation Europe. - <http://fsfeurope.org/index.de.html>.
- Fröde, W. 1987:** Windmühlen. - Ellert & Richter Verlag, Hamburg.
- Gasch, R. 1996:** Windkraftanlagen. - Teubner Verlag, Stuttgart.
- Gerdas, G. Schwenk, B. & Pahlke, T. 1997:** Ergebnisse mit WASP in mäßig strukturiertem Gelände. - DEWI Magazin 11, 39-43.

- Gerth, W.P. & Christoffer, J. 1994:** Windkarten von Deutschland. - Meteorologische Zeitschrift, N.F.3, 67-77.
- Glas, U. & Keymer, U. 2001:** Wirtschaftlichkeit der Windkraftnutzung in Bayern. - Arbeiten der LBA, Heft 30.
- GLOBE 2003:** Global Land One-kilometer Base Elevation. - <http://www.freegis.org/geo-data.en.html>.
- Goede, H.M. 2003:** Private Wetterseiten. - <http://www.wetterstationen-online.net/>.
- Greenpeace 2003:** Was-Ist-Was? Die erneuerbaren Energien. - Greenpeace Magazin 6/03, 30-34.
- Griffel, F. 1998:** Componentware. - dpunkt Verlag, Heidelberg.
- Gross, G., Frey, T. & Trute, P. 2002:** Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände. - DEWI Magazin 20, 28-36.
- GTOPO30 2002:** Global 30 Arc Second Elevation Data Set. - <http://www.freegis.org/geo-data.en.html>.
- Haendle, F. & Jensen, S. 1974:** Eine Systematisierung der Grundlagen von Systemtheorie und Systemtechnik. In: Haendle, F. & Jensen, S.: Systemtheorie und Systemtechnik, 9-62.
- Hastedt-Marckwardt, C. 1999:** Workflow-Management-Systeme. - Informatik-Spektrum 22, 99-109.
- Hall, A.D. & Fagen, R.E. 1956:** Definition of a system. - Gen. Syst. 1, 18-28.
- HBS (Hamburger Bildungsserver) 1999:** Windfarmen in Kalifornien. - <http://www.hamburger-bildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/energie/erw0.html>.
- Heuser, H. 1991:** Analysis I. - Teubner, Stuttgart.
- Hierteis, M., 1999:** Einfluß der Topographie auf das Windfeld und auf die Leistung von. Universität Bayreuth, Diplomarbeit, 109 S.
- HLUG_a (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) 2003:** Umweltatlas Hessen - Klima, Mittlere Windgeschwindigkeiten Jahr 1981-1990. - <http://atlas.umwelt.hessen.de/>.
- HLUG_b (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie) 2003:** Umweltatlas Hessen - Windgeschwindigkeit. - <http://atlas.umwelt.hessen.de/>.
- HLVA (Hessisches Landesvermessungsamt) 1988:** Topographische Karte 1:25000. - HLVA, Wiesbaden.
- Jarass, L. 1980:** Windenergie. - Springer, Berlin.
- Jeffers, J.N.R. 1978:** An Introduction to Systems Analysis: with ecological applications. - Edward Arnold, London, UK.
- Kaltschmitt, M. & Fischediek, M. 1995:** Wind- und Solarstrom im Kraftwerksverbund. - Verlag C.F. Müller, Heidelberg.

- Kaltschmitt, M. & Marheineke, T. 1997:** Einführung und Aufbau. In: Kaltschmitt, M. & Wiese, A.: Erneuerbare Energien, 1-42. - Springer Verlag, Berlin.
- Kaltschmitt, M. & Wiese, A. 1997:** Einführung und Aufbau. In: Kaltschmitt, M. & Wiese, A.: Erneuerbare Energien, 427-466. - Springer Verlag, Berlin.
- Köpke, R. & Friedrich, M. 2003:** Hürdenlauf für den Klimaschutz. - Greenpeace Magazin 6/03, 29-34.
- Köthe, H.-K. 1994:** Stromversorgung mit Windgeneratoren. - Franzis Verlag, Poing.
- Kranz, J. & Hau, B. 1980:** Systems analysis in epidemiology. - Annual Reviews of Phytopathology 18, 67-83.
- Landgrebe, J., Kaschenz, H., Sternkopf, R., Westermann, B., Becker, K., Müller, W., Schneider, J., Burger, A., Kühleis, C. 2003:** Anforderungen an die zukünftige Energieversorgung – Analyse des Bedarfs zukünftiger Kraftwerkskapazitäten und Strategie für eine nachhaltige Stromnutzung in Deutschland. - Umweltbundesamt, Berlin.
- Lauer, W. 1995:** Klimatologie. - Westermann Schulbuchverlag, Braunschweig.
- Leser, H., Haas, H.-D., Mosimann, T. & Paesler, R. 1995:** Wörterbuch der Allgemeinen Geographie. Band 1. - dtv/westermann, München.
- Leuschner, U. 2003:** Stromausfall in USA wurde durch grobe Verstöße gegen Sicherheitsstandards verursacht. - <http://www.udo-leuschner.de/energiechronik/chframe.htm>.
- Marx, K. 2001:** Windkraftanlagen sind ein Gefahrenpotenzial für die Bevölkerung. - Kreisanzeiger Vogelsberg vom 14.12.2001.
- Meadows, D.H, Meadows, D.I., Randers, J., Behrens III; W.W. 1972:** The Limits to growth. - Universe Books, New York, USA.
- Merz, B., Friedrich, J., Zschau, J., Bormann, P., Parolai, S., Milkereit, K., Richwalski, S., Roth, F., Wang, R. 2002:** Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen: Von der Gefährdung zum Risiko - Beispiel Erdbebenmikrozonierung, 135 - 145. - Zweijahresbericht GeoForschungs Zentrum Potsdam, Potsdam.
- Molly, J.P. 2002:** Wind Energy Future - Offshore and Offgrid ? - DEWI Magazin 21, 51-55.
- Nitsch, J. 2000:** Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. - Umweltbundesamt, Berlin.
- Odum, E.P. 1999:** Ökologie. - Thieme Verlag, Stuttgart.
- Pac, R. 1999:** Shuttle Radar Topography Mission. - Druckerei Thierbach GmbH, Mühlheim/R.
- RP_a (Regierungspräsidium Mittelhessen) 2001:** Regionalplan Mittelhessen 2001. - Regierungspräsidium Gießen, Gießen.
- RP_b (Regierungspräsidium Mittelhessen) 2003:** Eine kleine Reise durch Mittelhessen. - www.rp-giessen.de/ku_fr/freizeit/b_reise.htm.
- RP_c (Regierungspräsidium Mittelhessen) 2003:** Region Mittelhessen - Struktur und Verwaltung. - http://www.rp-giessen.de/fr_st_ve.htm.

- Rykiel, E.J. 1996:** Testing ecological models: the meaning of validation. - Ecological Modelling 90, 229-244.
- Salmon, J.R., A.J. Bowen, A.M. Hoff, R. Johnson, R.E. Mickle, P.A. Taylor, G. Tetzlaff & J.L. Walmsley 1987:** The Askervein Hill Project: Mean wind variations at fixed height above ground. - Boundary-Layer Meteorology 43, 247-271.
- Schaeben, H.; Apel, M.; Boogaart, K.G.v.d. & Kroner, U. 2003:** GIS 2D, 3D, 4D, nD. - Informatik Spektrum 26, 173-179.
- Schirmer, H. 1996:** Klimabewertung des Raumes als Abwägungsmaterial für die Landes- und Regionalplanung. - Akademie für Raumforschung und Raumplanung, Braunschweig.
- Schlaich, J. 1995:** The Solar Chimney. - Edition Axel Menges, Stuttgart.
- Schmidt, M. 2002:** Regenerative Energien in der Praxis. - Huss Medien GmbH - Verlag Bauwesen, Berlin.
- Schmitz, U. 2003:** Den Stromnetzen fehlt noch die IT Verknüpfung. - Computerzeitung 50, 20.
- Schulze, W. 1982:** Naturgeographische Grundlagen. In: Schulze, W. & Uhlig, H.: Gießener Geographischer Exkursionsführer - Mittleres Hessen, 5-27. - Brühlscher Verlag, Gießen.
- Seifert, C. 1990:** Meteorologische Analyse der Wind- und Strahlungsverhältnisse in deutschen Mittelgebirgen. - Giessener Geographische Schriften 68, Gießen.
- Shannon, R.E. 1975:** Systems Simulation: the art and science. - Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Speth, P.; Kerschgens, M.; Beuermann, G.; Schradin, H. & Farny, D. 2000:** Zukünftige Modifikation regionaler Klimate und deren Berücksichtigung im Entscheidungsprozessen von Unternehmungen. - Zwischenbericht des Teilprojekts C1 im SFB 419 der Universität Köln, http://www.uni-koeln.de/sfb419/c1/ergebnis/c1_0100.pdf.
- Taylor, P.A. & H.W. Teunissen 1987:** The Askervein Hill Project: Overview and background data. - Boundary-Layer Meteorology 39, 15-39.
- Teege, G. 2001:** Geodaten im Internet. - Informatik-Spektrum 24, 193-206.
- Teng, P.S. 1981:** Validation of computer models of plant disease epidemics: a review of philosophy and methodology. - Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz 88, 49-63.
- Trittin, J. 2002:** Zukunft der Windenergie liegt auf See. - BMU-Pressedienst, 015/02 Berlin, 29.01.2002.
- Troen, I. und E. L. Petersen, 1989:** European Wind Atlas. - Riso National Laboratory, Dänemark.
- UBA (Umweltbundesamt) 2001:** # 26 Emissionen - Versauerung. - <http://www.umweltbundesamt.de/Luft/emissionen/situation-de/wirkungen/sauer-eutro/versauerung.htm>, 28.11.2001.

VDWI (Verband der dänischen Windkraftindustrie) 2003: Handbuch der Windenergie. - <http://www.windpower.org/de/>.

Wedekind, H., Görz, G., Kötter, R. & Inhetveen, R. 1998: Modellierung, Simulation, Visualisierung: Zu aktuellen Aufgaben der Informatik. - Informatik-Spektrum 21, 265-272.

Wetterwebring 2003: Verzeichnis Wetterwebring. - <http://www.wetterwebring.de/>.

Weyl, R. 1982: Erdgeschichte und geologischer Aufbau. In: Schulze, W. & Uhlig, H.: Gießener Geographischer Exkursionsführer - Mittleres Hessen, 1-4. - Brühlscher Verlag, Gießen.

8 Anhang

8.1 Referenzsystem

Referenzsystem für die Verarbeitung der Geodaten des DGM 25 in IDRISI.

```
ref. system : Gauss-Krueger Zone 3
projection  : Transverse Mercator
datum       : WGS84
delta WGS84 : 0 0 0
ellipsoid    : Bessel 1841
major s-ax  : 6377397.155
minor s-ax   : 6356078.963
origin long  : 9
origin lat   : 0
origin X     : 500000
origin Y     : 0
scale fac    : 0.9996
units        : m
parameters   : 0
```

8.2 Metadaten DGM 25 Mittelhessen

Dateiverzeichnis DGM Mittelhessen - Rohdaten														
Nr.	Name	KByte ascii	vot	ist	Spalten	Zeilen	Datensätze (ds) theor.	real	rel.	B/ds	X Werte minimum	maximum	Y Werte minimum	maximum
1	4258_25.xyz	7088	4477	393	401	501	200901	191002	0.95	37.11	3424000	3440000	5580000	5600000
2	4260_25.xyz	2535	1665	222	302	501	151302	71002	0.47	37.11	3427950	3440000	5580000	5620000
3	4262_25.xyz	9701	6127	590	602	501	301802	261404	0.87	37.11	3435950	3460000	5580000	5640000
4	4458_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3440000	3460000	5580000	5600000
5	4460_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3440000	3460000	5580000	5620000
6	4658_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3460000	3480000	5580000	5600000
7	4660_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3460000	3480000	5580000	5620000
8	4662_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3460000	3480000	5580000	5640000
9	4858_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3480000	3500000	5580000	5600000
10	4860_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3480000	3500000	5580000	5620000
11	4862_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3480000	3500000	5580000	5640000
12	5058_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3500000	3520000	5580000	5600000
13	5060_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3500000	3520000	5580000	5620000
14	5062_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3500000	3520000	5580000	5640000
15	5258_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3520000	3540000	5580000	5600000
16	5260_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3520000	3540000	5580000	5620000
17	5262_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3520000	3540000	5580000	5640000
18	5460_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3540000	3560000	5580000	5620000
19	5462_25.xyz	9315	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	37.11	3540000	3560000	5580000	5640000
20	4256_25.xyz	6172	4489	491	501	501	251001	191500	0.76	32.23	3420000	3440000	5560000	5580000
21	4456_25.xyz	8089	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	32.23	3440000	3460000	5560000	5580000
22	4664_25.xyz	349	254	61	102	302	30804	10804	0.35	32.30	3455950	3460000	5552040	5562040
23	4664_25.xyz	7455	5422	491	501	501	251001	231300	0.92	32.23	3460000	3480000	5540000	5560000
24	4864_25.xyz	8089	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	32.23	3480000	3500000	5540000	5560000
25	5064_25.xyz	8089	5884	491	501	501	251001	251001	1.00	32.23	3500000	3520000	5540000	5560000
Summen		206,707 00	134,330 00	111,377 00										
Prozent		100 00	64 94	5 60										

8.3 Programm: extract.pas

Pascalprogramm zur Extraktion von Geodatenausschnitten des DGM 25.

```
PROGRAM ausschnitt5;
USES
  wincrt;
VAR
  f,g: Text;
  x,y,z,limx1,limy1,limx2,limy2: Real;
  counterA,counterR: Longint;
  quelle, ziel: String;

BEGIN
  counterA:=0; counterR:=0;
  Writeln('Programmzweck: Ausschnitt aus Geodaten wählen und in Datei
schreiben.');
```

Writeln('Eingegeben werden Eckpunkte links oben und rechts unten (Gauß-Krüger-Netz.');

Writeln('Oben links, Punkt x,y: '); Readln(limx1,limy1);

Writeln('Unten rechts, Punkt x,y: '); Readln(limx2,limy2);

Write('Name der Quelldatei ? '); Readln(quelle);

Write('Name der Zieldatei ? '); Readln(ziel);

Assign(f,quelle);

Reset(f);

Assign(g,ziel);

Rewrite(g);

WHILE NOT Eof(f) DO

BEGIN

Readln(f,x,y,z);

IF (x>=limx1) AND (y<=limy1) AND (x<=limx2) AND (y>=limy2) THEN

BEGIN Writeln(g,x:11:3,' ',y:11:3,' ',z:7:3); counterA:=counterA+1; END

ELSE

BEGIN {Writeln(x:11:3,' ',y:11:3,' ',z:7:3);} counterR:=counterR+1; END

END;

Close(f);

Close(g);

Writeln('Auftrag ausgeführt. Es wurde ',counterA,' mal extrahiert aus ',counterA + counterR,' Datensätzen.');

END.

8.4 Programm: minmax.pas

Programm zum Aufsuchen von Extremwerten und der Bestimmung der Zahl der Spalten und Zeilen eines Geodatenatzes.

```
PROGRAM minmax1; {setzt geordnete Geodaten voraus}
USES
  wincrt;
VAR
  f,g: Text;
  x,y,z,minx,miny,maxx,maxy,ax,ax0,Spalten,Zeilen: Real;
  i,row,column,counterAlle: Longint;
  quelle: String;

BEGIN
  row:=0; column:=1; Spalten:=0; Zeilen:=0; counterAlle:=0; i:=0;
  Writeln('Programmzweck: Bestimmen von Minimum- und Maximumkoordinaten aus
Geodaten.');
```

Writeln('Eingegeben wird der Name der Quelldatei der Geodaten.');

Writeln;

Write('Name der Quelldatei ? '); Readln(quelle);

Assign(f,quelle);

Reset(f);

Assign(g,'rows.txt');

Rewrite(g);

Readln(f,x,y,z);

minx:=x; maxx:=x; miny:=y; maxy:=y; ax:=x; ax0:=x;

counterAlle:=counterAlle+1; Writeln;

Writeln('Die Startwerte lauten: ');

Writeln('Minimales x: ',minx:9:2,' Maximales x: ',maxx:9:2);

Writeln('Minimales y: ',miny:9:2,' Maximales y: ',maxy:9:2);

Writeln('Zahl der bisher bearbeiteten Datensätze: ',counterAlle:10); Writeln;

WHILE NOT Eof(f) DO

BEGIN

Readln(f,x,y,z); ax:=x; counterAlle:=counterAlle+1;

IF (minx>x) THEN

BEGIN minx:=x; END;

IF (maxx<x) THEN

BEGIN maxx:=x; END;

IF (miny>y) THEN

BEGIN miny:=y; END;

IF (maxy<y) THEN

BEGIN maxy:=y; END;

IF (ax=ax0) THEN BEGIN row:=row+1; END

ELSE BEGIN i:=i+1; Write(g,row:3,' '); column:=column+1; row:=0; ax0:=x;

END;

IF (i=10) THEN BEGIN Writeln(g,ax:7:2); i:=0; END;

END;

Writeln; Write(g,quelle);

Close(f); Close(g);

Spalten:=(maxx-minx)/40 + 1;

Zeilen:=(maxy-miny)/40 + 1;

```
Writeln('Auftrag ausgeführt. ');
Writeln('Die Zahl der Spalten beträgt: ',Spalten:5:2);
Writeln('Die Zahl der Zeilen beträgt: ',Zeilen:5:2);
Writeln('Die Zahl der gezählten Spalten ist: ',column:5);
Writeln('Zahl der bisher bearbeiteten Datensätze: ',counterAlle:10); Wri-
teln;
Writeln;
Writeln('Die Endwerte lauten: ');
Writeln('Minimales x: ',minx:9:2,' Maximales x: ',maxx:9:2);
Writeln('Minimales y: ',miny:9:2,' Maximales y: ',maxy:9:2);

END.
```


Erklärung

Ich versichere, daß ich diese Diplomarbeit selbständig verfaßt und durchgeführt habe. Neben den in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmitteln habe ich keine anderen verwendet.

Ich habe die Diplomarbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Alsfeld, den 31.03.2004